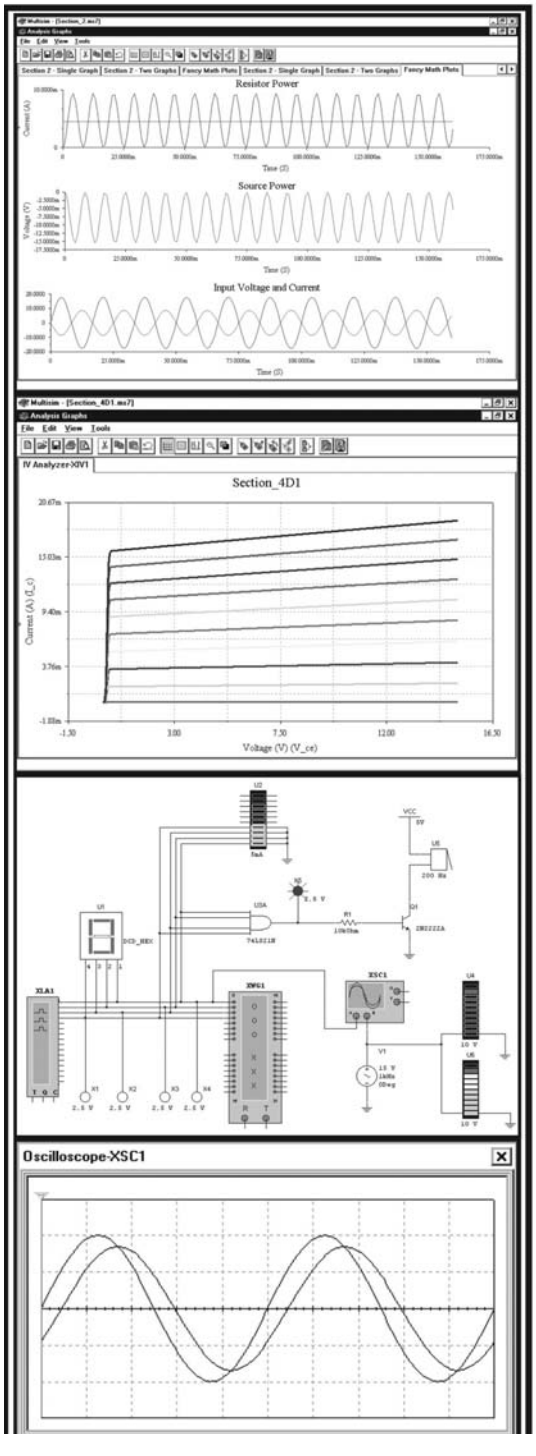
Multisim® 7

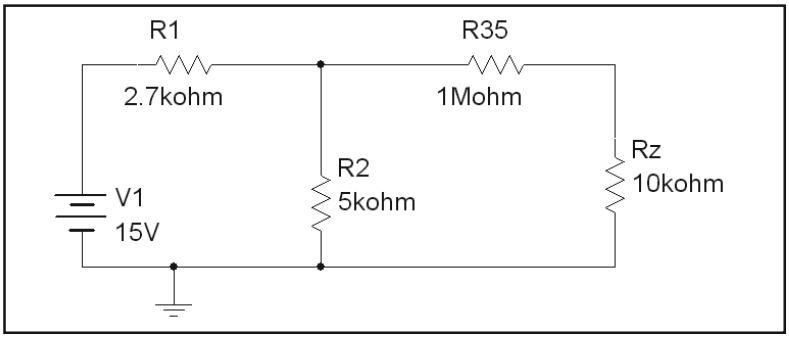
СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СХЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Марк Е. Хернитер
(Marc E. Herniter)



Введение

Данное руководство предназначено для пользователей, стремящихся научиться работать с программой моделирования электрических схем Multisim 7 от компании Electronics Workbench. Книга представляет собой сборник примеров, которые показывают, как создать схему, выполнить различные анализы, а также разобраться в полученных результатах. Данное издание не является учебником по теории электрических цепей или электронике; в нем сделана попытка научить читателей моделировать множество схем, с которыми им, возможно, придется работать. К примеру, это может быть схема постоянного тока, представленная ниже:



Предполагается, что читатели обладают знаниями, необходимыми для анализа схем. Руководство также рассчитано на пользователей, которые хотят проверить свои решения (или свою интуицию) с помощью программы Multisim. Читатели смогут построить схему на экране (как описано в 1-й главе), а затем выполнить моделирование схемы (согласно разделу 3.1) или воспользоваться функцией DC Sweep (в соответствии с разделом 4.1).

Книга может использоваться студентами в ходе всего курса обучения и в дальнейшей работе. Каждая ее глава посвящена определенному типу анализа схем, а содержащиеся в ней примеры касаются схем, изучаемых в начальных курсах по усилителям высокого уровня и ключевым схемам. Можно без проблем пропустить разделы, которые покажутся слишком сложными. Все главы включают простые и сложные схемы, позволяющие проиллюстрировать различные типы анализа. Не обязательно читать все подряд. Отдельные примеры связаны с определенными темами. Однако начинающим пользователям рекомендуется полностью прочесть 1-ю и 2-ю главы, чтобы научиться создавать и сохранять схемы, а также пользоваться программами Postprocessor и Grapher. В 1-й главе также рассматривается применение осциллографа, и поэтому с ней необходимо ознакомиться в первую очередь. Глава 6 посвящена анализу во временной области.

Такие инструменты Multisim, как Multimeter и Oscilloscope, описаны в соответствующих разделах. Всем пользователям рекомендуется изучить примеры в 3, 4 и 5-й главах, а также те примеры, которые относятся к более ранним темам. Первые примеры в этих главах рассмотрены очень подробно, так как они предназначены для демонстрации возможностей программы.

Примеры, рассмотренные в книге, относятся ко всему курсу теории цепей. Они отражают установившиеся процессы в схемах на постоянном и переменном токе и переходные процессы в цепях с одним конденсатором (или катушкой индуктивности) и ключом. Примеры демонстрируют все эти процессы. После их изучения читатель сможет моделировать похожие задачи. В общих курсах по электронике рассматриваются цепи смещения транзисторов, исследуются коэффициент усиления и амплитудно-частотные характеристики усилителей. В приведенных примерах используются соответствующие типы анализа.

В конце каждого раздела даны упражнения. В них приводятся схема и результаты, полученные во время моделирования. Студентам предлагается решить эти задачи, чтобы сравнить полученные ответы с приведенными в книге. Цель этих упражнений состоит не в изучении электрических схем, а в том, чтобы можно было попрактиковаться в работе с программой. По моему убеждению, программное обеспечение, моделирующее работу электрических схем, должно использоваться только для проверки расчетов. Во время своих лекций я предлагаю студентам задания, которые они должны сначала рассчитать вручную, затем смоделировать в программе Multisim, а потом проверить в лаборатории. Студенты сравнивают результаты эксперимента с расчетами, выполненными вручную, а также с результатами, полученными в программе Multisim. Без расчетов вручную невозможно убедиться, что моделирование Multisim было безошибочным.

Перед тем как приступить

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Предполагается, что вы работаете с двух- или трехкнопочной мышью. Слова «***ЛЕВАЯ* (*ПРАВАЯ*)** кнопка» относятся, соответственно, к левой и правой кнопкам мыши. (Слово «щелкнуть» без уточнения какой именно кнопкой мыши относится по умолчанию к левой кнопке. — *От ред.*)
- Весь текст, выделенный **полужирным шрифтом**, относится к пунктам в меню, например: команды **File** и **Run**.
- Весь текст, выделенный прописными буквами, относится к клавишам на клавиатуре. Например: «нажмите клавишу **ENTER**».
- ***Если текст выделен другим шрифтом, это значит, что он отображается на экране монитора. Это относится ко всему тексту, кроме команд в меню.***
- `Если текст выделен листингом, это значит, что нужно ввести его в программе.`
- Слово «выбрать» означает «щелкнуть мышью по ...».
- Стрелка ⇒ означает, что действия выполняются последовательно в указанном порядке. (*От ред.*)

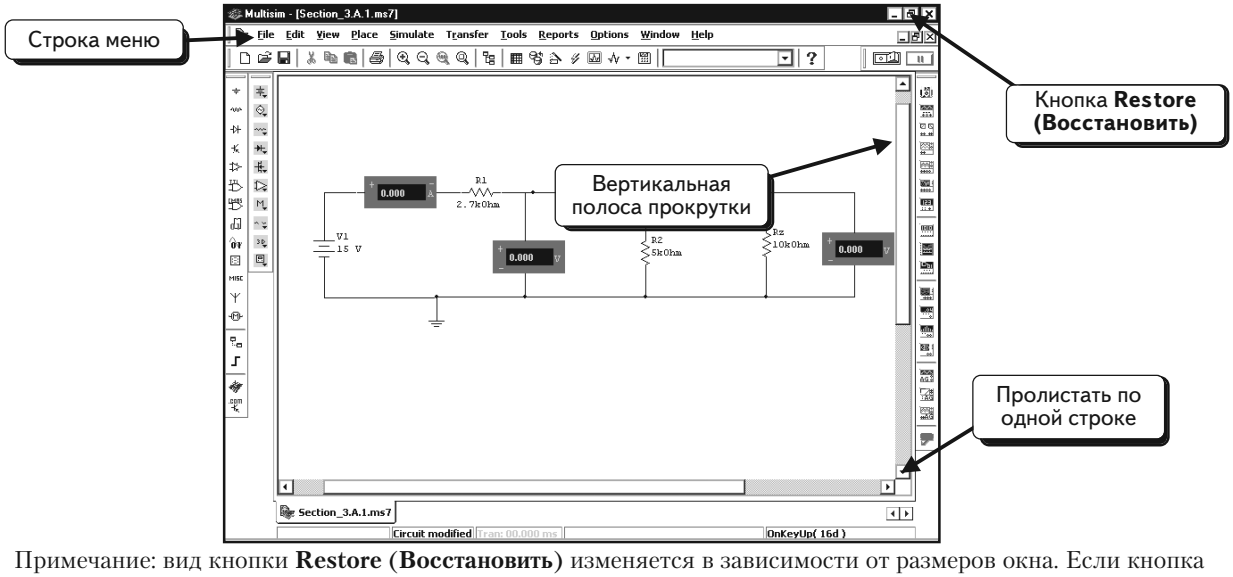
КОМБИНАЦИИ КЛАВИШ

В этой книге приведен ряд комбинаций клавиш, которые представляют собой ссылки на различные команды меню. Их описания будут приведены позднее. Помните о том, что данные комбинации заменяют команды меню:

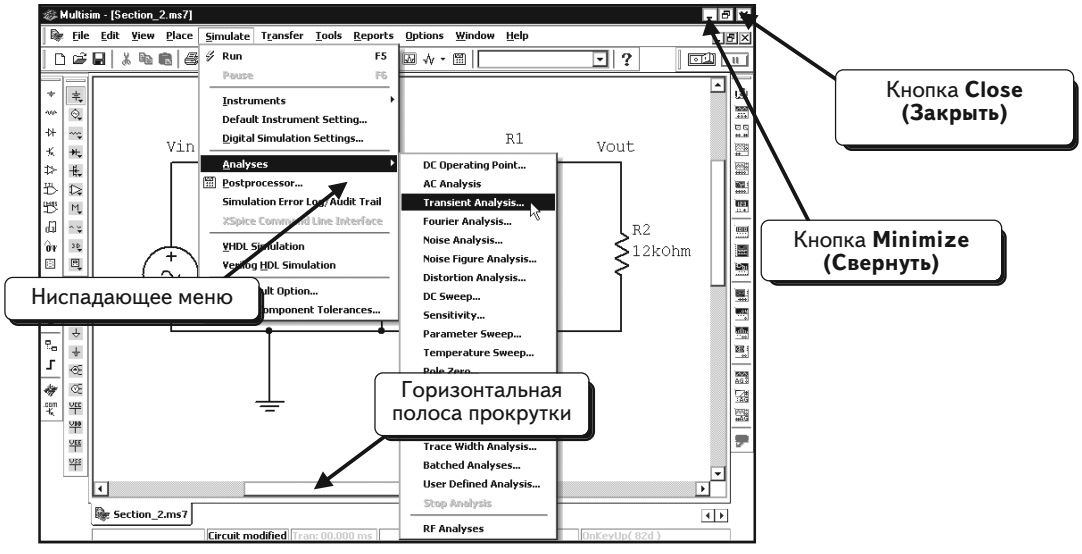
- Для выполнения многих команд применяется клавиша **«CTRL»**. Например, комбинация **«CTRL+R»** означает: «удерживая нажатой клавишу **«CTRL»**, нажмите клавишу **«R»**, комбинация **«CTRL+A»** — «удерживая нажатой клавишу **«CTRL»**, нажмите клавишу **«A»**. Клавиатуры могут быть разными: на некоторых клавиша **«CTRL»** может обозначаться как **«Control»**.
- Комбинация **«ALT+TAB»** в среде Microsoft Windows используется для переключения между активными окнами. Комбинация **«ALT+TAB»** означает: «удерживая нажатой клавишу **«Alt»**, нажмите клавишу **«Tab»**.

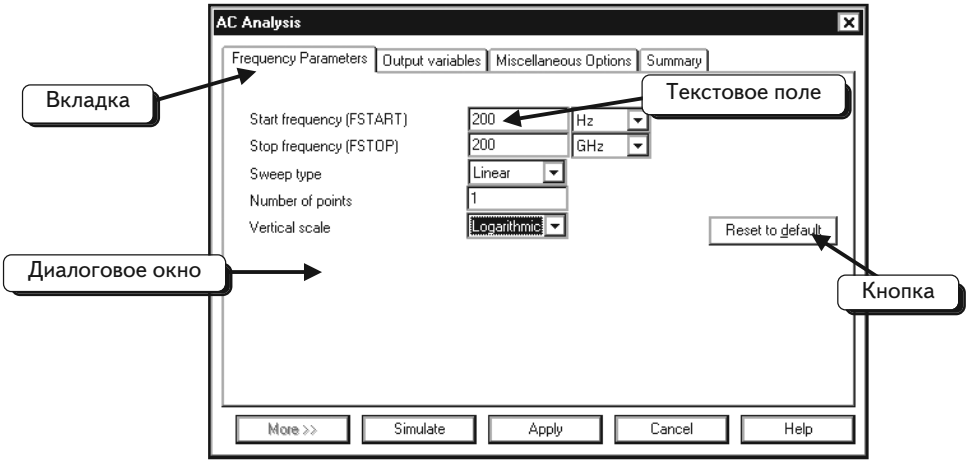
Термины Windows, используемые в книге

В книге использовано большое количество терминов, связанных с работой в среде Windows. Часть терминов приведена ниже:



Примечание: вид кнопки **Restore (Восстановить)** изменяется в зависимости от размеров окна. Если кнопка имеет вид , то она используется для уменьшения размера окна, если же вид , то применяется для развертывания окна на весь экран.


Multisim - [Section_2.ms7]
File Edit View Place Simulate Transfer Tools Reports Options Window Help
Run F5
Pause F6
Instruments
Default Instrument Setting...
Digital Simulation Settings...
Analyses
Postprocessor...
Simulation Error Log/ Audit Trail
VHDL Simulation
Verilog HDL Simulation
DC Operating Point...
AC Analysis
Transient Analysis...
Fourier Analysis...
Noise Analysis...
Noise Figure Analysis...
Distortion Analysis...
DC Sweep...
Sensitivity...
Parameter Sweep...
Temperature Sweep...
Trace Width Analysis...
Batched Analyses...
User Defined Analysis...
Stop Analysis
RF Analyses
Vin
R1
Vout
R2
12kOhm
Section_2.ms7
Circuit modified
Кнопка Close (Закрыть)
Кнопка Minimize (Свернуть)
Ниспадающее меню
Горизонтальная полоса прокрутки


AC Analysis
Frequency Parameters
Output variables
Miscellaneous Options
Summary
Start frequency (FSTART)
200
Hz
Stop frequency (FSTOP)
200
GHz
Sweep type
Linear
Number of points
1
Vertical scale
Logarithmic
Reset to default
More >>
Simulate
Apply
Cancel
Help
Вкладка
Текстовое поле
Диалоговое окно
Кнопка

Оглавление

ГЛАВА 1. РЕДАКТИРОВАНИЕ БАЗОВОЙ СХЕМЫ 1

1.1. Запуск программы Multisim 1
1.2. Размещение компонентов 4
1.3. Исправление ошибок 25
1.4. Подключение компонентов 26
1.5. Заземление схемы 28
1.6. Удаление провода при ошибочном подключении 32
1.7. Разметка узлов 32
1.8. Вывод и модификация блока заголовка (штампа) 34
1.9. Трехмерные компоненты 38
1.10. Задачи 42

ГЛАВА 2. ФУНКЦИИ POSTPROCESSOR И GRAPHER 47

2.1. Создание одного графика 50
2.2. Создание двух графиков с кривыми 61
2.3. Создание трех графиков 66
2.4. Сохранение и загрузка страниц 76
2.5. Удаление объектов в программе Postprocessor 80
2.5.1. Удаление кривой из графика 80
2.5.2. Удаление графика со страницы 83
2.5.3. Удаление страницы 86
2.6. Изменение параметров графика в программе Grapher 87
2.6.1. Добавление сетки и легенды 88
2.6.2. Толщина, цвет и ярлык кривой 90
2.6.3. Изменение заголовков и ярлыков осей 95
2.6.4. Добавление второй оси y 98
2.7. Использование курсора 103
2.8. Увеличение и уменьшение масштаба 110
2.9. Сохранение и открытие страниц в программе Grapher 118
2.10. Задачи 121

ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ 123

3.1. Схемы с резисторами 123
3.1.1. Измерения с использованием индикаторов 123
3.1.2. Измерения с помощью мультиметра 133
3.1.3. Использование ваттметра 140
3.1.4. Анализ DC Operating Point Analysis 143
3.2. Анализ узловых напряжений в цепях с зависимыми источниками 147
3.3. Ток и напряжение диода 150
3.3.1. Изменение температуры, принятой при моделировании 154
3.4. Получение эквивалентных схем по теоремам Тевенина и Нортона 156
3.5. Рабочая точка транзистора 161
3.6. Задачи 171

ГЛАВА 4. ВАРИАЦИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ 176

4.1. Основы анализа на постоянном токе 176
4.2. Вольтамперная характеристика диода 197
4.2.1. Получение вольтамперных характеристик диода с помощью IV-плоттера 201
4.3. Передаточные кривые на постоянном токе 204
4.3.1. Ограничитель на стабилитроне 204
4.3.2. Передаточная кривая для инвертора на транзисторах NMOS 207
4.4. Вложенный анализ DC Sweep. Характеристики биполярного транзистора BJT 211
4.4.1. Получение вольтамперных характеристик биполярного транзистора BJT с помощью IV–плоттера 214
4.5. Коэффицент усиления по току для BJT 218
4.5.1. Зависимость коэффициента усиления H_{FE} от тока эмиттера 218
4.5.2. Зависимость коэффициента усиления H_{FE} от тока I_C при различных значениях V_{CE} 224
4.6. Задачи 229

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ МОДУЛЯ И ФАЗЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ 233

5.1. Измерение модуля и фазы при одной частоте 234
5.1.1. Измерение модуля с помощью приборов 234
5.1.2. Измерение модуля и фазы с помощью функции AC Analysis 240
5.2. Графики Боде 252
5.2.1. Создание графиков Боде с помощью Боде-плоттера 252
5.2.2. Создание графиков Боде с помощью функции AC Analysis 257
5.3. Анализ коэффициента усиления усилителя 264
5.4. Коэффициент усиления операционного усилителя 269
5.5. Вариация параметров. Полоса пропускания ОУ 281
5.6. Мощность переменного тока и коррекция коэффициента мощности 287
5.6.1. Коррекция коэффициента мощности 290
5.7. Измерение полного комплексного сопротивления 292
5.7.1. Измерение активного сопротивления с помощью мультиметра 292
5.7.2. Измерение сопротивления в пассивной схеме с помощью анализа SPICE 294
5.7.3. Измерение сопротивления в активной схеме с помощью анализа SPICE 297
5.8. Задачи 301

ГЛАВА 6. АНАЛИЗ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ 315

6.1. Использование виртуального осциллографа 315
6.1.1. Временная развертка 319
6.1.2. Настройка масштаба напряжения для каналов A и B 321
6.1.3. Настройки синхронизации 326
6.1.4. Использование курсоров 330
6.2. Измерение фазы в емкостной схеме 335
6.3. Измерение фазы в индуктивной схеме 339
6.4. Последовательная резонансная RLC-цепь 344
6.5. Стабилизатор постоянного тока 353
6.5.1. Непрерывный стабилизатор. Моделирование в виртуальной лаборатории 356
6.5.2. Непрерывный стабилизатор напряжения. Моделирование с использованием функции SPICE Transient Analysis 365

6.6. Схема ограничителя на стабилитроне. Исследование с помощью SPICE Transient Analysis ... 378
6.7. Схема ограничителя на стабилитроне. Моделирование в виртуальной лаборатории ... 385
6.7.1. Получение передаточных характеристик ... 389
6.8. Размах напряжения на транзисторе ... 392
6.8.1. Анализ Фурье в программе Multisim ... 396
6.9. Интегрирующая схема на виртуальном ОУ ... 404
6.10. Триггер Шмитта на операционном усилителе ... 410
6.11. Многовариантный анализ. Скорость переключения инвертора ... 415
6.12. Вариация по температуре. Непрерывный стабилизатор ... 422
6.13. Компоненты с предельными параметрами ... 427
6.14. Задачи ... 432

ГЛАВА 7. ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ... 439

7.1. Цифровые индикаторы, генераторы сигнала и инструменты ... 439
7.1.1. Инструменты Word Generator и Logic Analyzer ... 440
7.1.2. Цифровой пробник и недешифрирующие столбиковые индикаторы ... 454
7.1.3. Различные индикаторы сигналов ... 459
7.2. Схемы, содержащие аналоговые и цифровые модели ... 464
7.3. Моделирование схем, содержащих только цифровые компоненты ... 469
7.4. Схема с обнулением при запуске ... 472
7.5. Цифровое моделирование и задержки на логических элементах в идеальном и реальном режимах ... 475
7.5.1. Цифровое моделирование в идеальном режиме ... 475
7.5.2. Цифровое моделирование в реальном режиме ... 477
7.6. Задачи ... 480

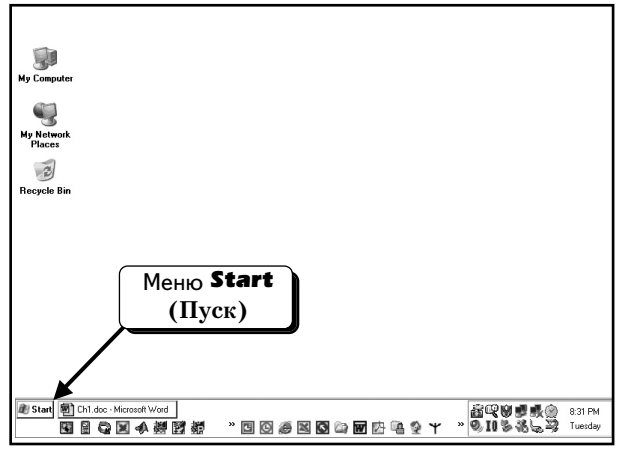
8. ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ... 481

ГЛАВА 1
Редактирование базовой схемы

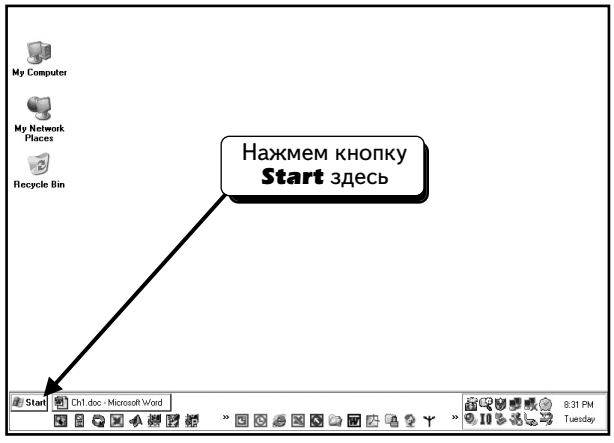
В этой главе рассказано, как нарисовать схему в программе Multisim. Процесс включает в себя выбор и добавление компонентов, соединение их проводниками, заземление схемы и разметку узлов. В главе 2 вы выполните простое моделирование и научитесь создавать графики с помощью функции Postprocessor. Главы 1 и 2 этого руководства являются вводными и содержат информацию, необходимую для создания схем и просмотра результатов. В других главах описано моделирование электрических схем. Рекомендуется прочитать главы 1 и 2 последовательно (некоторые примеры последующих глав связаны с методиками, описанными в главах 1 и 2). Затем можно в произвольном порядке изучать примеры в других главах.

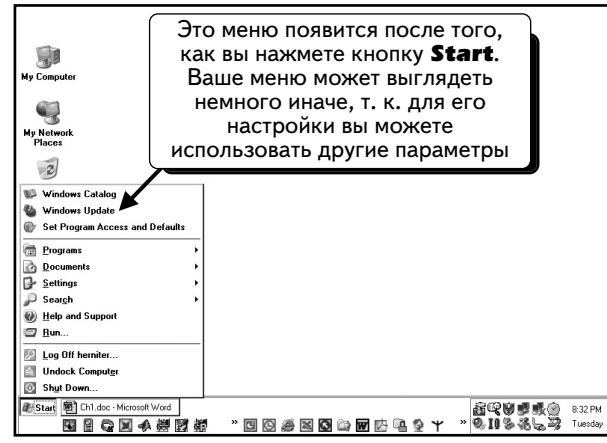
1.1. Запуск программы Multisim

Если программа Multisim правильно установлена на вашем компьютере, ее можно запустить из меню **Start (Пуск)** среды Windows. В зависимости от конфигурации рабочего стола и используемой версии Windows меню **Start** может различаться. Примеры данной книги были созданы в среде Windows XP Professional с классической версией меню **Start**. Его кнопка, как правило, отображается в нижней части рабочего стола:

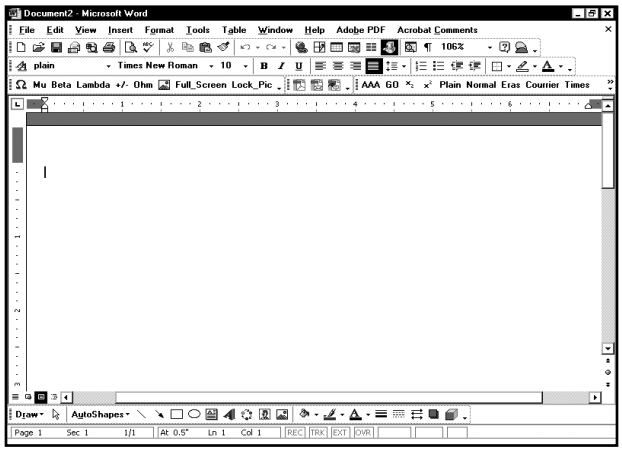


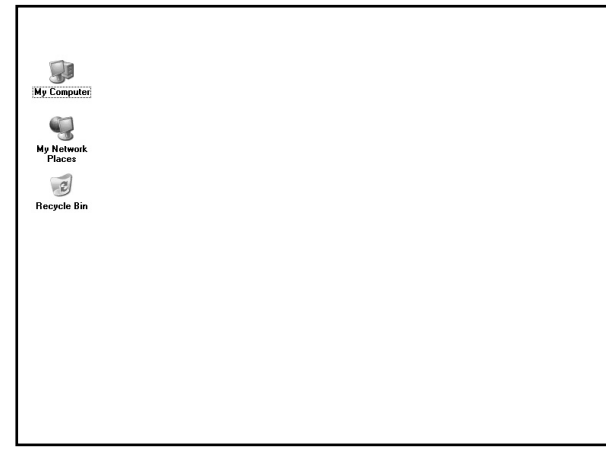
В этом месте можно щелкнуть по кнопке **Start**  и продолжить:



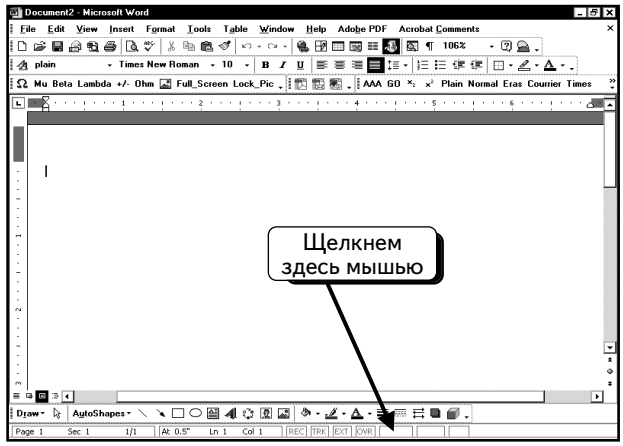


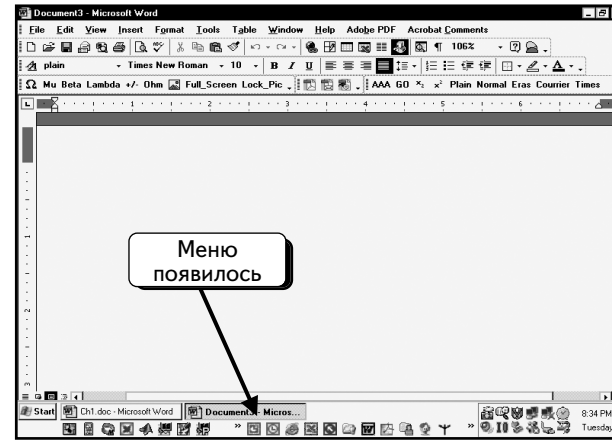
Но если рабочий стол выглядит так, как показано ниже, значит, меню **Start** скрыто:



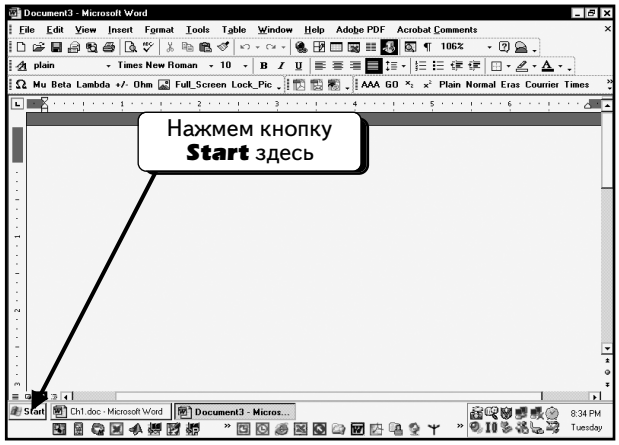


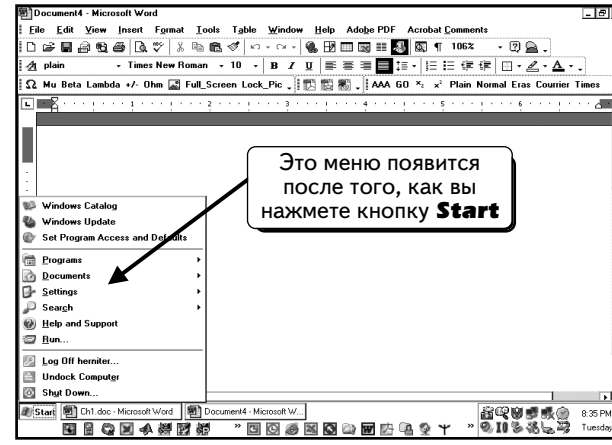
Можно вызвать меню **Start** двумя способами. Переместим курсор мыши в нижнюю часть экрана. После этого появится меню **Start**:



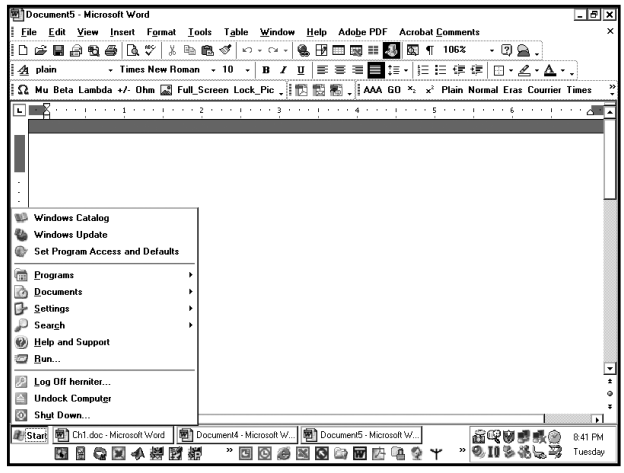


Этот способ работает, если меню **Start** было сконфигурировано таким образом, чтобы отображаться поверх других окон и был выбран режим автоматического скрытия меню. Можно нажать кнопку **Start**  и продолжить:

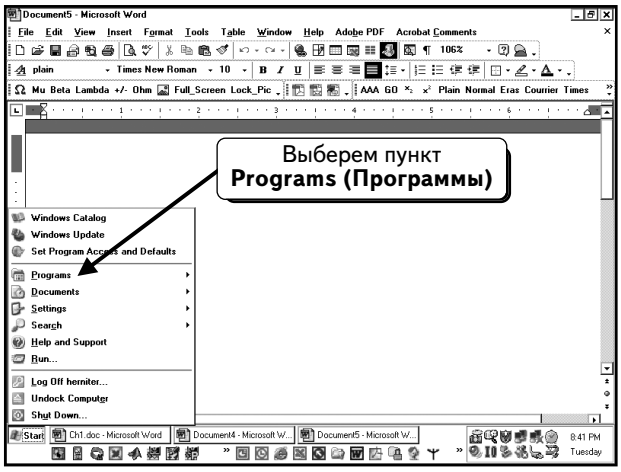


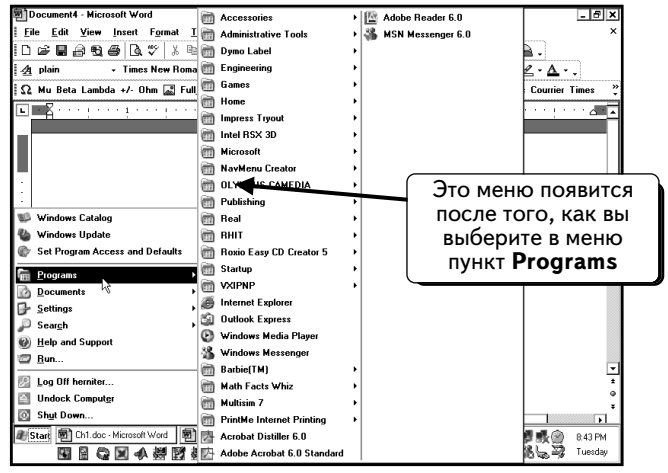


Однако если по-прежнему меню **Start** не видно, то можно выбрать одну из трех опций: во-первых, нажать клавишу **Start**  на клавиатуре; во-вторых, нажать клавиши **CTRL+ESC**. Тогда откроется меню **Start**, и кнопка **Start**  также будет активна; и в-третьих, при работе на устаревшей клавиатуре (где клавиша **Start** отсутствует), можно курсором мыши перетащить меню **Start** из нижней части экрана вверх. В приведенном примере была нажата клавиша **Start** :

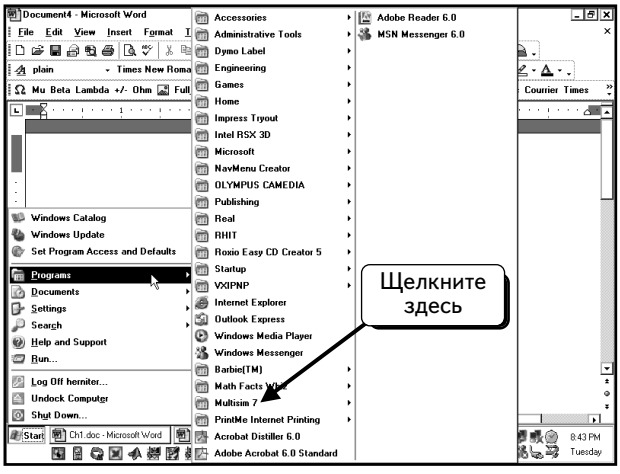


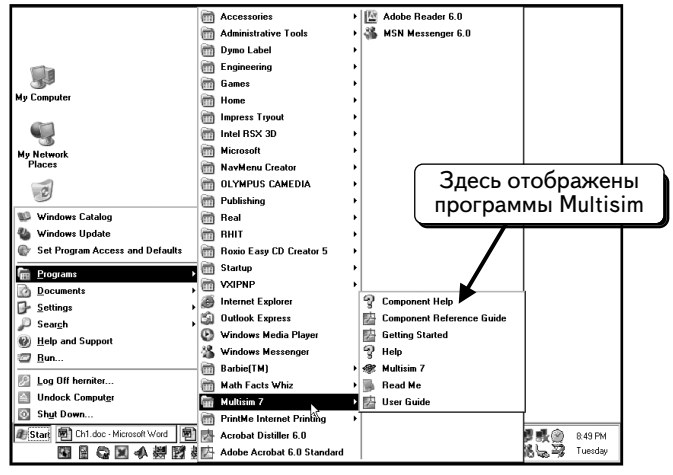
Теперь меню **Start** появилось на экране. Выберем пункт **Programs (Программы)**:



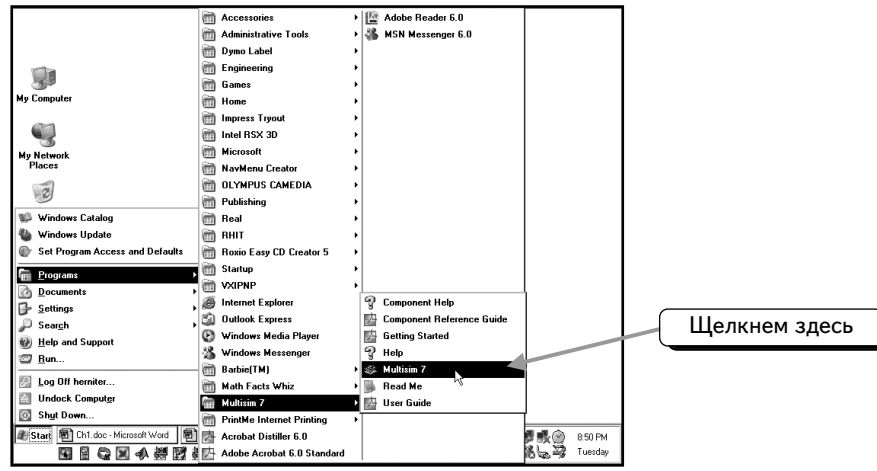


После этого откроются списки программ и групп программ. Программы пакета Multisim находятся в группе **Multisim 7**. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по пункту **Multisim 7** — будет отображен список программ в группе:

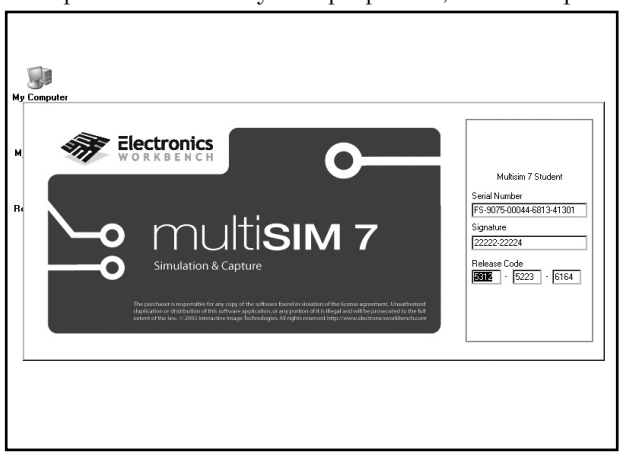


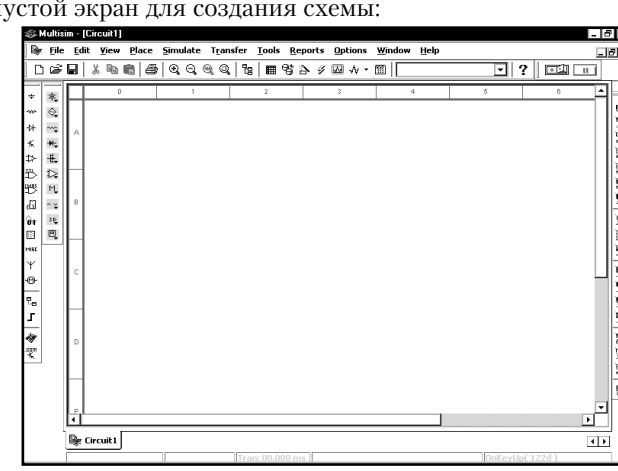


Чтобы запустить программу, щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по пункту **Multisim 7**:



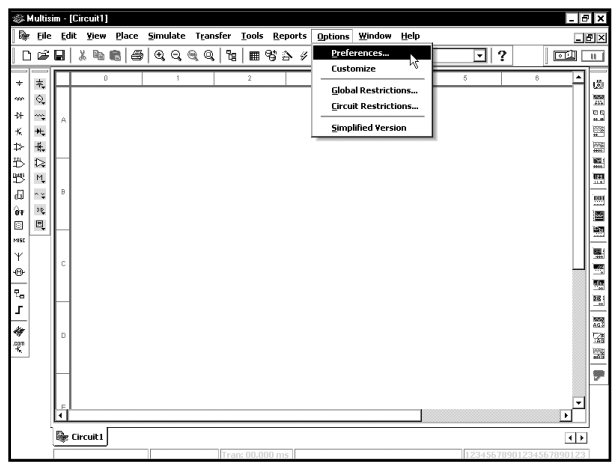
Отобразится окно запуска программы, затем откроется пустой экран для создания схемы:

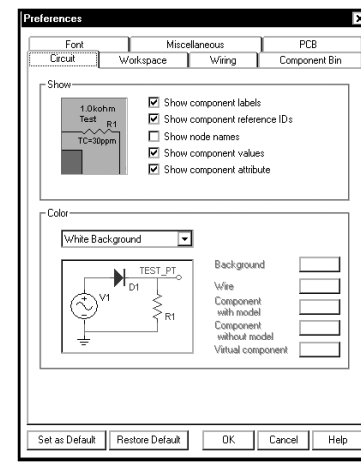




1.2. Размещение компонентов

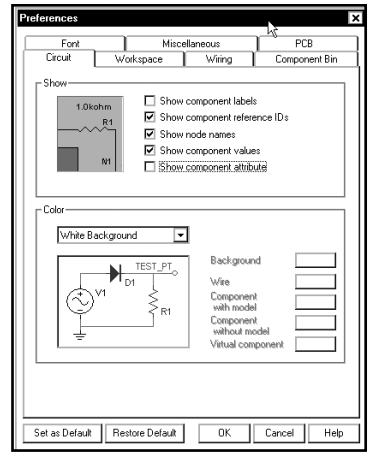
Перед тем как размещать компоненты, следует проверить настройку одной из опций Multisim, чтобы убедиться, что мы работаем с одинаковыми параметрами системы. Выберем в меню Multisim пункты **Options (Опции)** и **Preferences (Параметры)**:



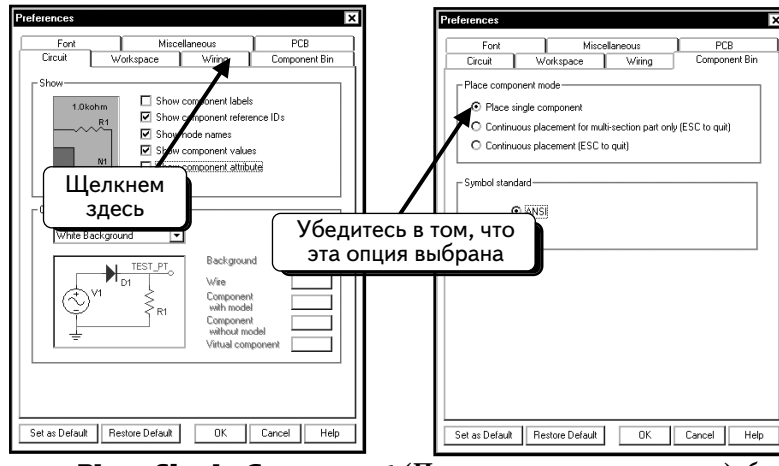


В приведенном диалоговом окне выбрана вкладка ***Circuit* (Схема)**. Верхняя панель окна позволяет указать, какая информация должна отображаться около каждого компонента схемы. Большая часть информации пока не нужна, поэтому отключим эту опцию. В данный момент необходимо видеть только три названия компонентов, например, R1 или R2 для резистора (а также C1 или C2 для конденсатора), и их значения, к примеру,

1,0 кОм (1.0 kOhm) для резистора. Название компонента — это ID компонента, а его значение называется значением компонента. Будем отображать эти сведения около условных обозначений, а также отобразим названия узлов схемы. Это позволяет упростить работу с функцией Postprocessor. Иногда названия узлов загромождают схему, но они помогают работать с компонентами. Кроме того, будем обозначать определенные узлы схемы как «vin» и «vout» (входное и выходное напряжение). Убедитесь в том, что настройки вашей системы соответствуют настройкам, приведенным ниже:

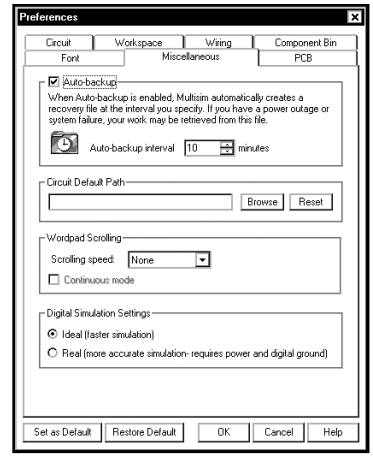


Далее выберем вкладку **Component Bin (Компоненты)**:

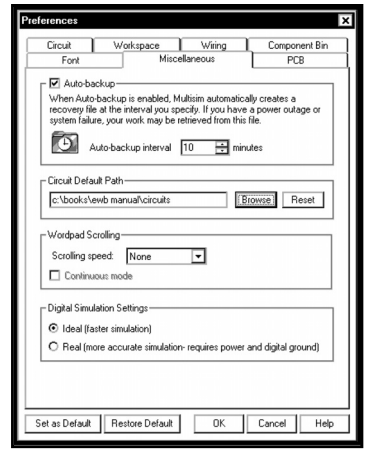


Должна быть выбрана опция **Place Single Component (Поместить один компонент)**, благодаря которой можно помещать компоненты по одному без опасения добавить два одинаковых компонента по ошибке.

И наконец выберем вкладку **Miscellaneous (Разное)**:



С помощью этой вкладки укажем папку для сохранения файлов. Нажмем кнопку **Browse (Найти)** и выберем нужную папку, после чего в диалоговом окне появится путь к ней:

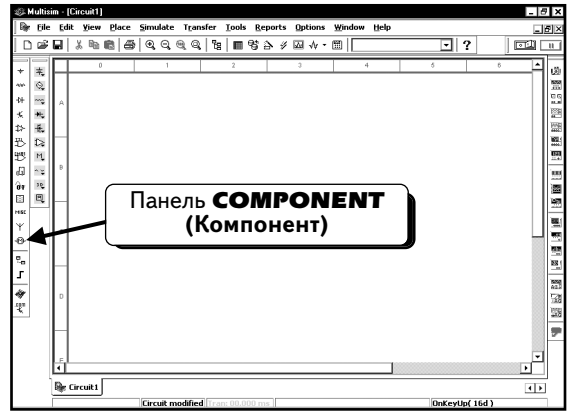


Теперь выполнены все изменения настроек, которые необходимы для воспроизведения примеров, данных в этой книге. При желании можно поэкспериментировать самостоятельно.

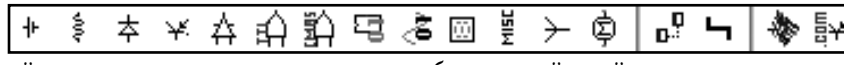
Далее следует сохранить настройки, которые были только что установлены. Если нажать кнопку **Set as Default (Использовать по умолчанию)**, настройки на вкладке **Preferences** будут и в дальнейшем использоваться для всех создаваемых схем. Если же просто нажать кнопку **OK**, изменения будут применены только к текущей схеме, а все следующие схемы будут использовать установленные ранее настройки. Нажмем кнопку **Set as Default**, а затем кнопку **OK**, чтобы вернуться к окну для создания схемы.

Теперь создадим схему сами. Сначала понадобится независимый источник переменного напряжения. В программе Multisim можно использовать два типа источников. Один называется источником питания AC и позволяет указывать действующие значения, другой — источником напряжения AC и требует указания амплитуды (максимального мгновенного значения напряжения). За исключением этого небольшого отличия, источники питания полностью повторяют друг друга. При взгляде на схему вы не сможете их различить. Поэтому некоторые рисунки в этой книге могут быть поняты неправильно. При работе с программой можно решить эту проблему: при двойном щелчке по источнику питания он будет идентифицирован. Далее будет рассказано о том, как добавить в схему каждый из этих источников питания.

Существуют три способа выбора компонентов: с помощью, во-первых, панелей инструментов и вкладки Component Bin, во-вторых, панелей инструментов и диалогового окна **COMPONENT (Компонент)** и, в-третьих, меню Multisim и диалогового окна Component. Оба независимых источника питания переменного тока добавляются в схему с использованием панелей инструментов и вкладки Component Bin, поэтому сначала расскажем об этой методике. Слева в окне видны две панели инструментов. Крайняя слева панель, **COMPONENT**, предоставляет доступ ко

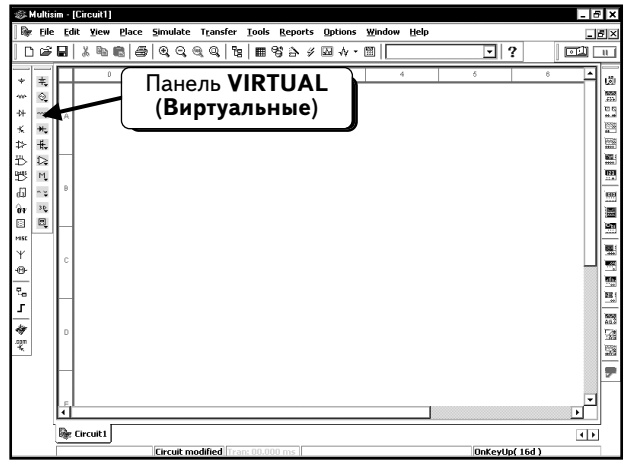


всем компонентам Multisim 7, а также к некоторым другим ресурсам, например, веб-сайтам Electronics Workbench и EDAparts.com. Увеличенная панель компонентов показана ниже:



При пользовании этой панелью выполняется несколько больше действий, но она позволяет разместить любой необходимый компонент. Более подробно панель **COMPONENT** будет рассмотрена позднее, когда она понадобится.

Для быстрого добавления источников питания переменного тока можно пользоваться панелью инструментов **VIRTUAL (Виртуальные)**, которая находится рядом с панелью **COMPONENT**:



Увеличенная панель инструментов **VIRTUAL** показана ниже:



Виртуальный компонент представляет собой идеальный компонент, такой, например, как диод, резистор, имеющий нестандартное значение, операционный усилитель (ОУ) и так далее. Если нажать одну из кнопок на панели инструментов, появится вложенная панель инструментов (будем называть ее «панель компонентов»). На ней можно быстро выбрать нужный компонент. Панель компонентов содержит стандартные компоненты, а именно:



— **Power Sources (Источники питания)** — одно- и трехфазные источники питания, а также источники питания постоянного тока и заземление;



— **Signal Sources (Источники сигнала)** — источники напряжения и тока: источники прямоугольного сигнала, кусочного-линейного сигнала и таймеры;



— **Basic Parts (Базовые компоненты)** — базовые компоненты, которые включают резисторы, конденсаторы, катушки и так далее;



— **Diodes and Zeners (Диоды и стабилитроны);**



— **Transistor Components (Транзисторные компоненты)** — биполярные транзисторы BJT, мощные полевые транзисторы MOSFET, арсенид-галлиевые транзисторы GaAsFET и полевые транзисторы JFET;



— **Analog Components (Аналоговые компоненты)** — операционные усилители (ОУ) и компараторы;



— **Miscellaneous Components (Прочие компоненты)** — аналоговые переключатели, предохранители, 7-сегментные дисплеи, двигатели, таймер 555-й серии и так далее;

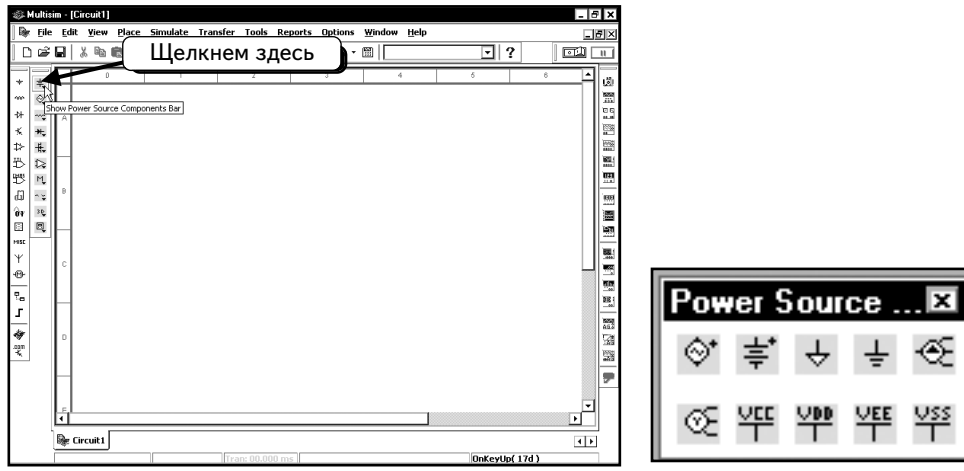


— **Rated Components (Компоненты с ограничениями)** — компоненты, которые имеют физические ограничения и могут выйти из строя при их превышении. Например, резисторы с ограничением по мощности или транзисторы с ограничением по коллекторному току. Если во время моделирования будет превышено предельное значение, компонент в схеме будет показан как вышедший из строя;

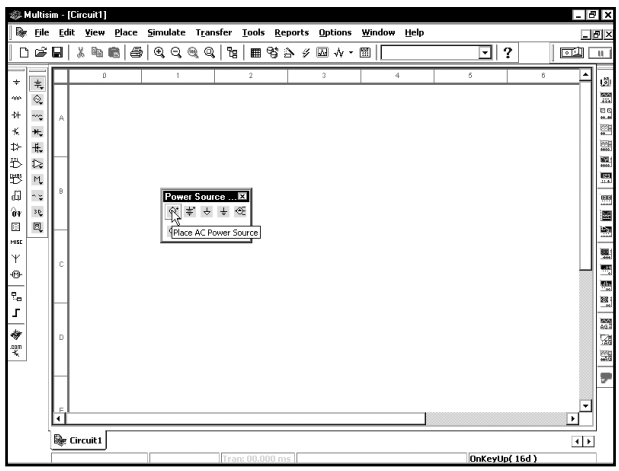
— **3D Components (Трехмерные компоненты)** — отображаются с использованием элементов трехмерной графики, таких как , и , вместо стандартных условных обозначений;

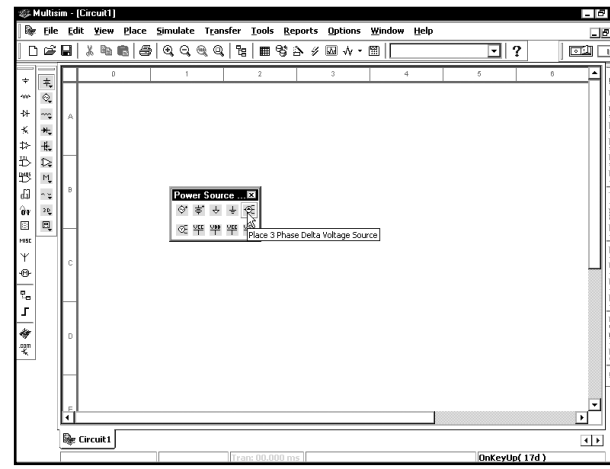
— **Measurements Components (Измерительные компоненты)** — устройства для измерения напряжения и тока, а также пробники логического уровня.

Добавим в схему источник питания AC и источник сигнала AC, чтобы показать различие между ними. Сначала создадим источник питания AC. Нажмем кнопку ***Show Power Source Components Bar*** **(Показать панель Power Source Components)** , как показано ниже:

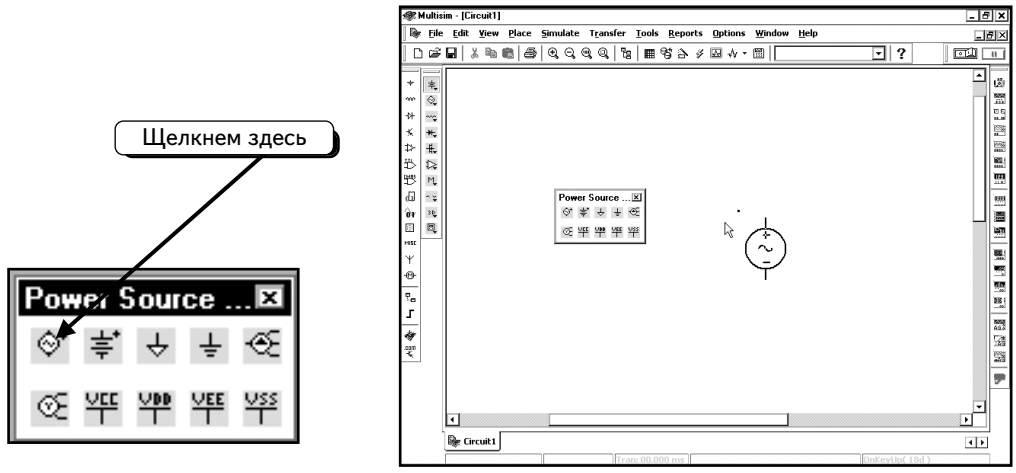


Отобразится панель инструментов ***Power Source Components***. На этой панели инструментов расположены стандартные источники питания, которые будут использоваться в схемах (например, источники напряжения DC, заземление и трехфазные источники питания), и источник питания AC, который надо добавить в схему. Чтобы увидеть описание компонента, соответствующего кнопке, задержим на ней курсор мыши. Через несколько секунд появится экранная подсказка:

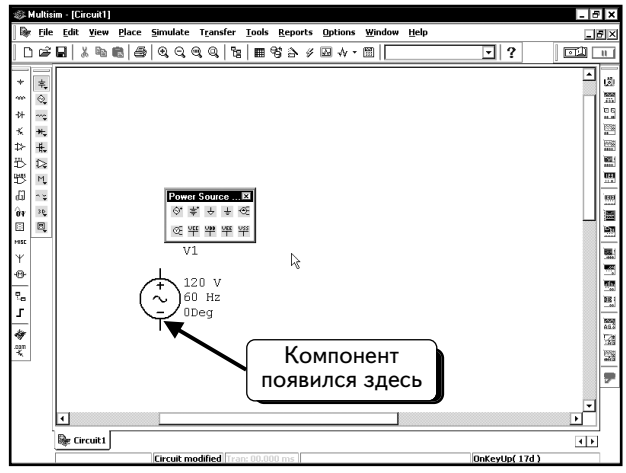




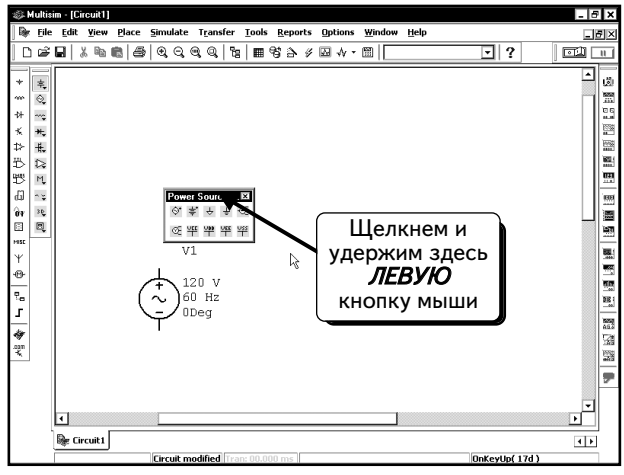
По описанию и изображению на панели легко найти нужный компонент. Чтобы добавить источник питания AC, щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по кнопке ***Place AC Power Source*** **(Добавить источник питания AC)** . Источник питания «привяжется» к курсору мыши и будет следовать за его передвижением:



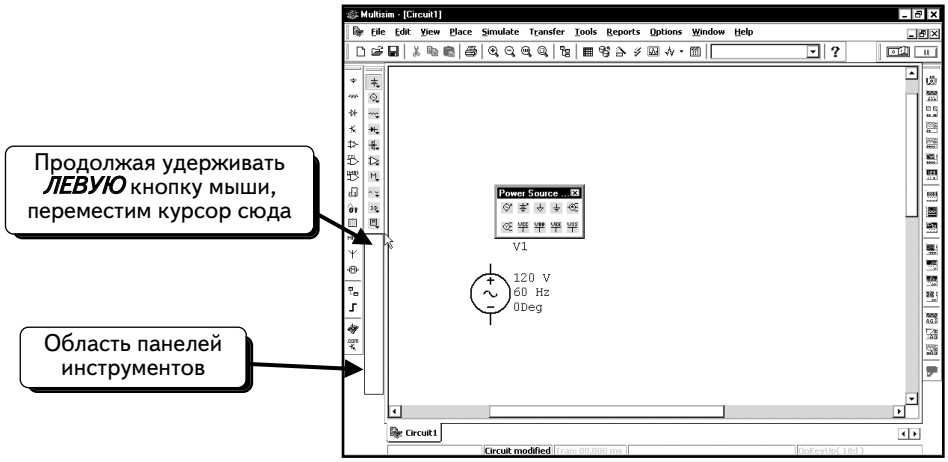
Переместим источник питания в нужное место и щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы добавить компонент:



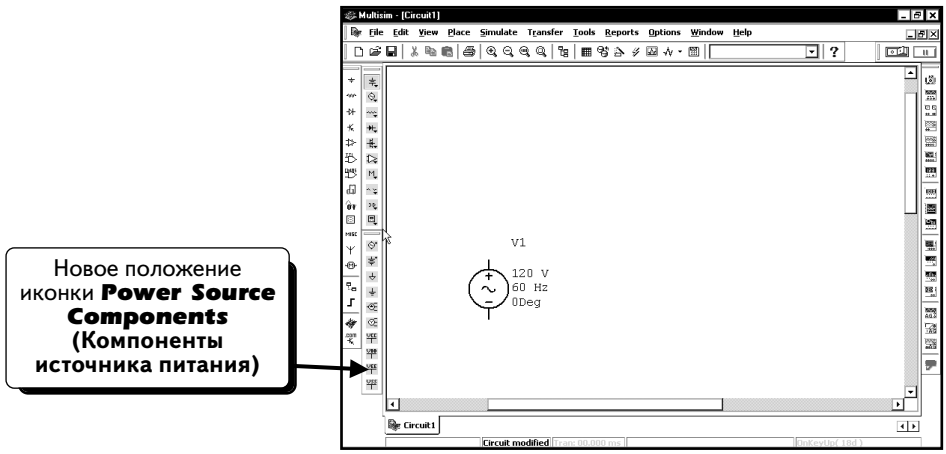
Панель инструментов **Power Source Components** используется настолько часто, что удобнее поместить ее рядом с компонентом. Можно переместить панель инструментов с помощью мыши, но следите за тем, чтобы не загромождать схему. Для перемещения панели инструментов выполним следующие действия. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, удерживая ее, на заголовке панели:



Продолжая удерживать нажатой ***ЛЕВУЮ*** кнопку мыши, переместим курсор так, как показано:

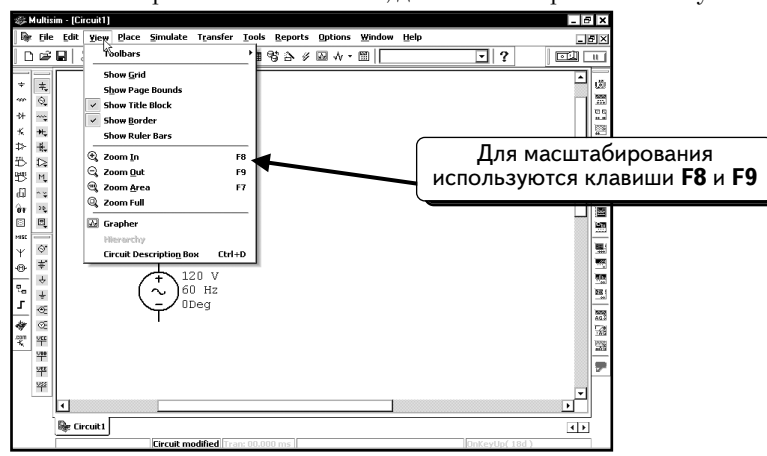


Отпустим кнопку мыши, когда переместим панель инструментов в нужное положение:



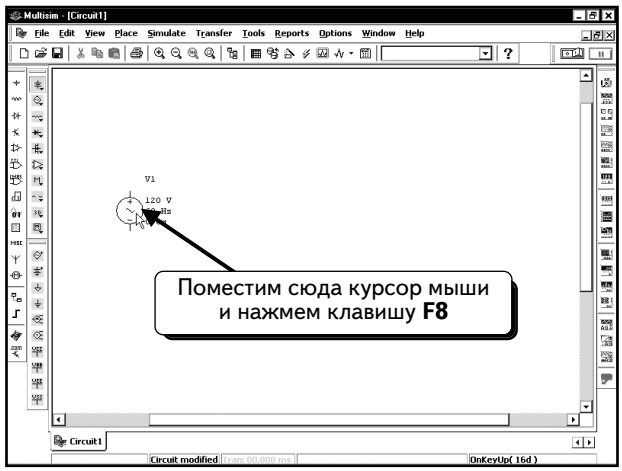
Теперь можно легко пользоваться панелью инструментов, чтобы добавлять компоненты. Компоненты этой панели часто используются, кроме того, при таком расположении панель инструментов не мешает нам работать со схемой. С помощью этого метода можно добавлять на рабочий стол и другие панели инструментов.

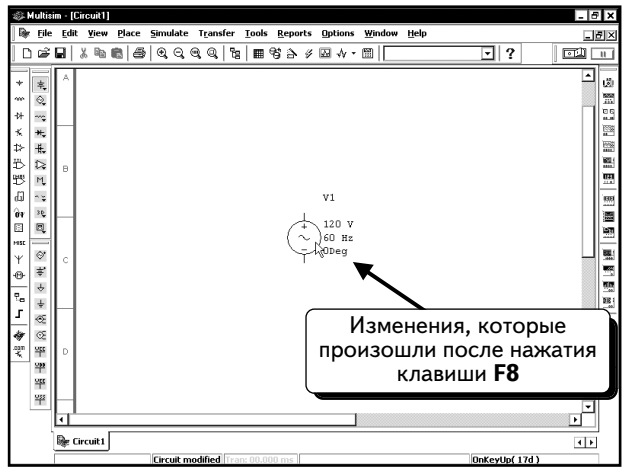
Теперь заменим параметры источника питания, чтобы настроить его на напряжение 12,6 В и частоту 60 Гц. Перед этим изменим масштаб условного изображения компонента, для чего выберем в меню пункт **View (Вид)**:



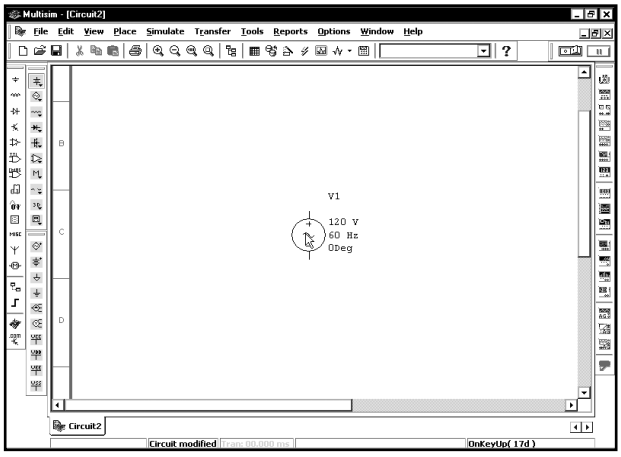
Не будем применять меню для масштабирования. В меню можно определить, какие клавиши следует нажать, и увеличить масштаб с помощью клавиши **F8** либо уменьшить его клавишей **F9**. Этот метод имеет преимущество по сравнению с командами меню или клавишами панели: вы можете поместить курсор мыши на объект, который хотите масштабировать, а потом нажать клавишу **F8** или **F9**. Если же вы работаете с командами меню, будет увеличена определенная область, которая не обязательно включает нужный вам компонент.

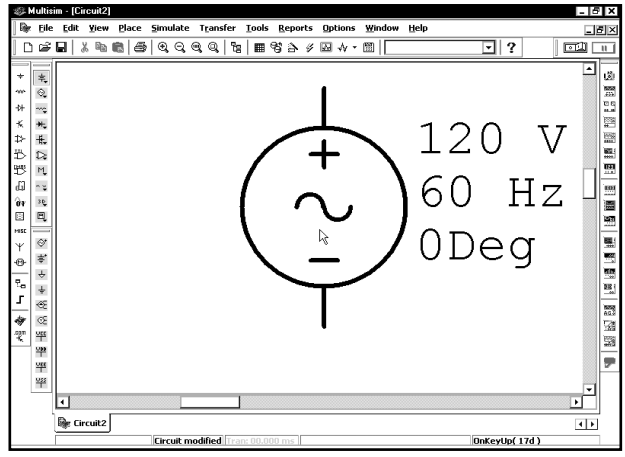
Поместим курсор мыши на источник питания и нажмем клавишу **F8**:



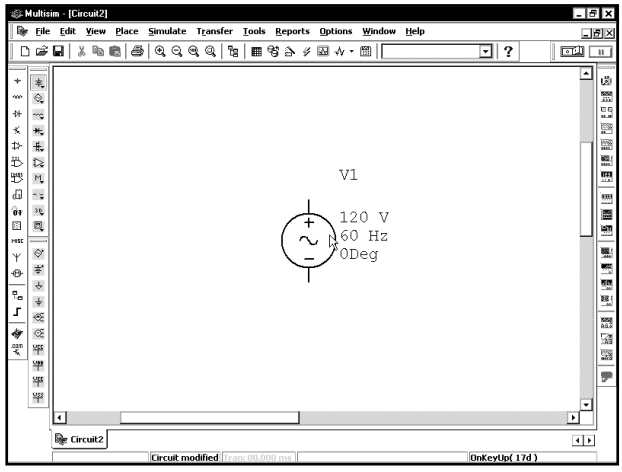


Можно повторить процесс несколько раз. Поместим курсор мыши на источник питания и повторно нажмем клавишу **F8**. Через мгновение появится результат:

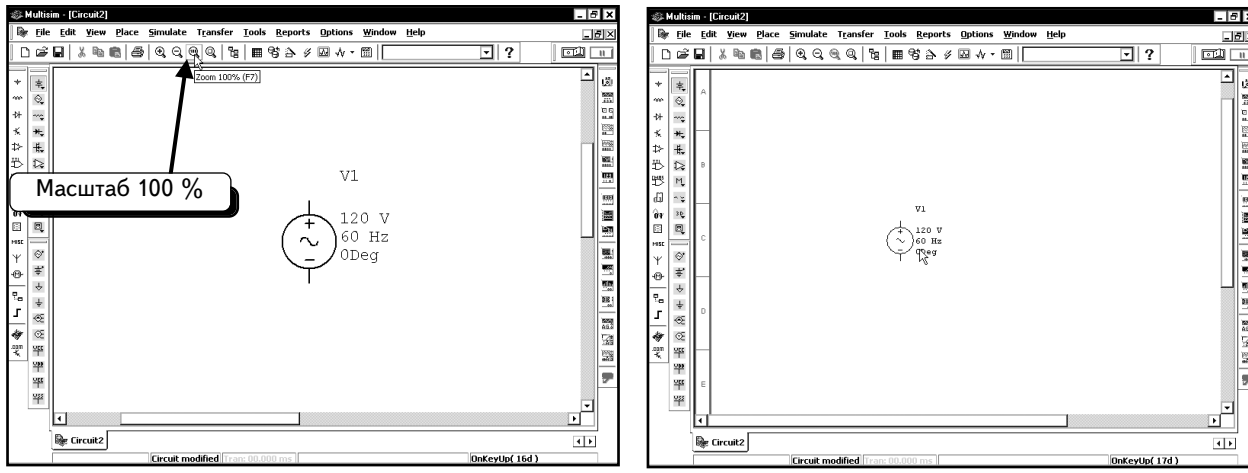




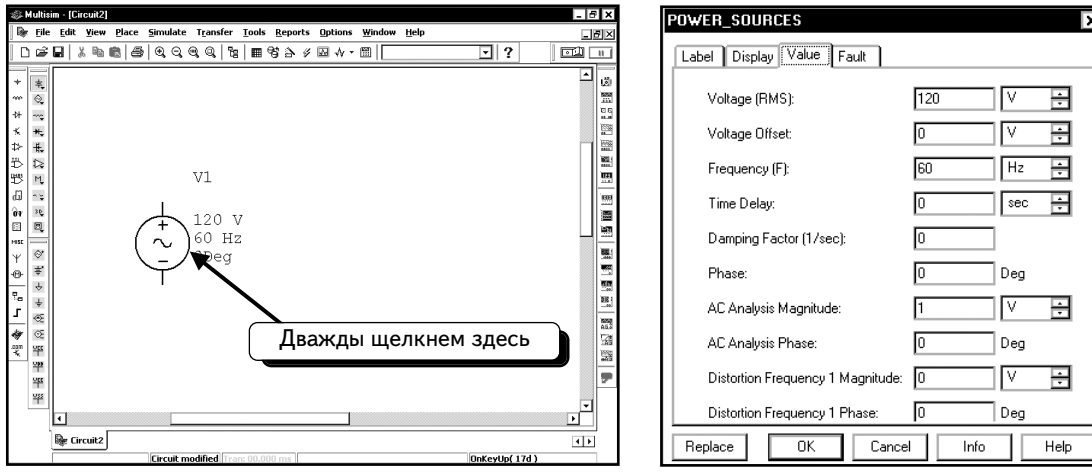
Если вы хотите уменьшить масштаб, нажмите курсором мыши на клавишу **F9**. Результат, полученный после нескольких нажатий клавиши **F9**, показан ниже:



Поэкспериментировав с масштабированием, можно восстановить начальный масштаб схемы с помощью кнопки **100 %** (или клавиши **F7**). Рекомендуем пользоваться клавишей **F7**, так как она выполняет масштабирование около курсора мыши. Если же нажать кнопку, результат может не совпасть с ожидаемым:



Теперь вы умеете выбирать удобный масштаб для текущей схемы.
Изменим параметры источника питания AC. Дважды щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по иконке. Откроется диалоговое окно:

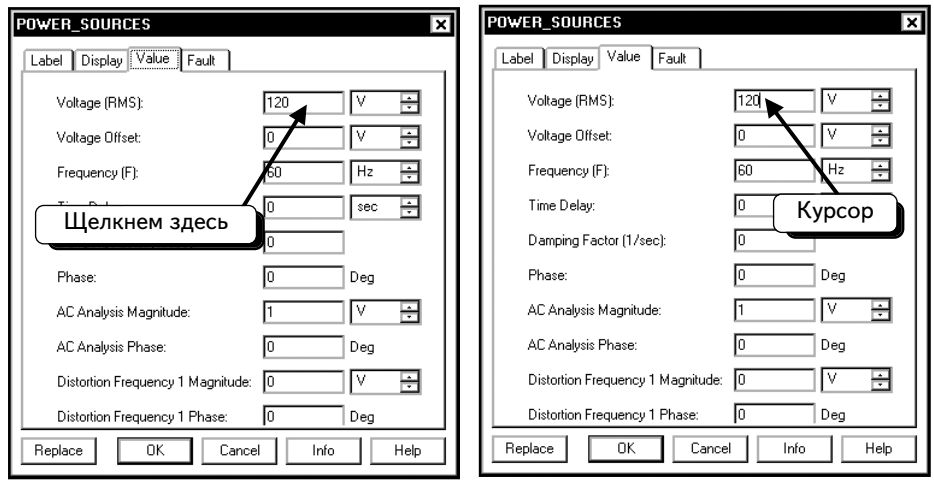


Эта часть диалогового окна позволяет изменять амплитуду, частоту и фазу источника питания. Для источника питания AC укажем действующее значение вместо амплитуды. Помните, что амплитуда представляет собой максимальное значение колебания. Соотношение между амплитудой синусоидального колебания и действующим значением определяется по формуле:

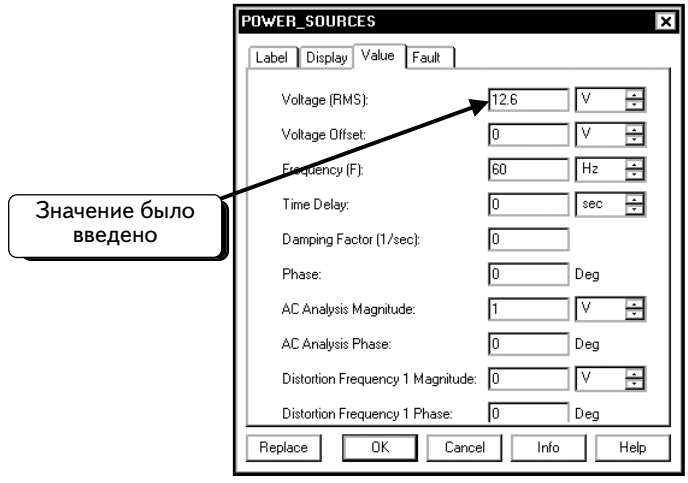
$$\textit{Действующее значение} = \frac{\textit{Амплитуда}}{\sqrt{2}}.$$

Если работать с действующими значениями, то можно указывать их, если с амплитудами — то укажите значение амплитуды. При изменении одного значения программа Multisim автоматически изменит и другие.

Когда говорилось, что надо настроить параметры источника питания на 12,6 В и 60 Гц, то не уточнялось, соответствует ли значение «12,6» действующему или амплитудному значению. Будем использовать значение «12,6» как действующее. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы поместить курсор в текстовое поле **Voltage (RMS — Действующее значение напряжения)**:



Теперь можно изменить содержимое текстового поля. С помощью клавиши **BACKSPACE** удалим текущее значение и введем «`12.6`»:



Обратите внимание на то, что можно выбирать единицы измерения для амплитуды. По умолчанию используются вольты. При желании можете изменить настройку: щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по верхней или нижней стрелке :

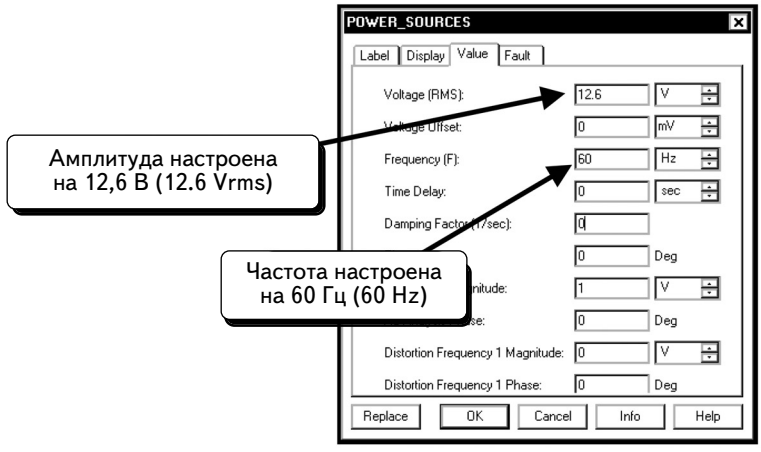


Вам доступны такие единицы измерения, как мкВ (μV), мВ (mV), кВ (kV) и МВ (MV). Примеры единиц измерения показаны:

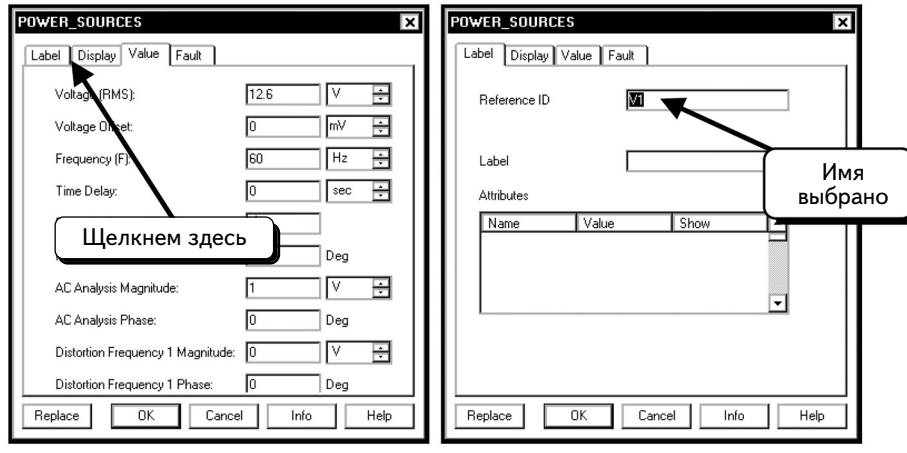


Собираясь добавить источник питания с действующим значением напряжения 12,6 В, не будем изменять единицы измерения.

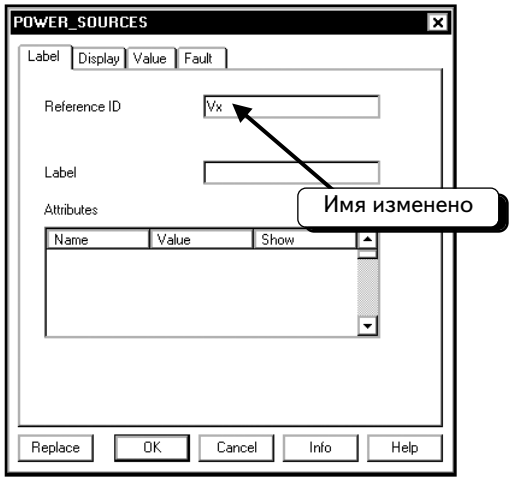
Аналогичным способом можно изменить частоту, но мы сохраним начальное значение (60 Гц) :



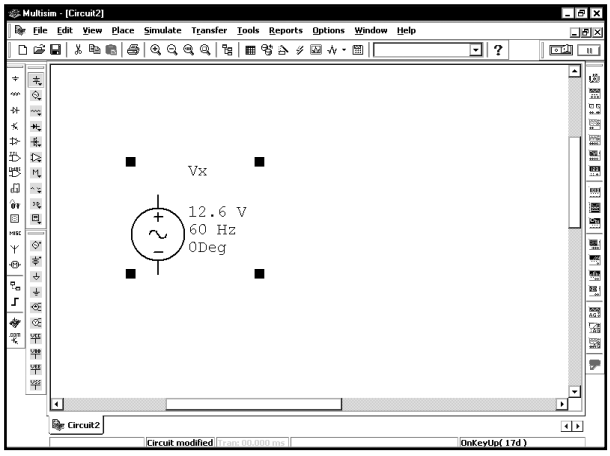
Чтобы изменить название источника напряжения, выберем вкладку **Label (Ярлык)**:



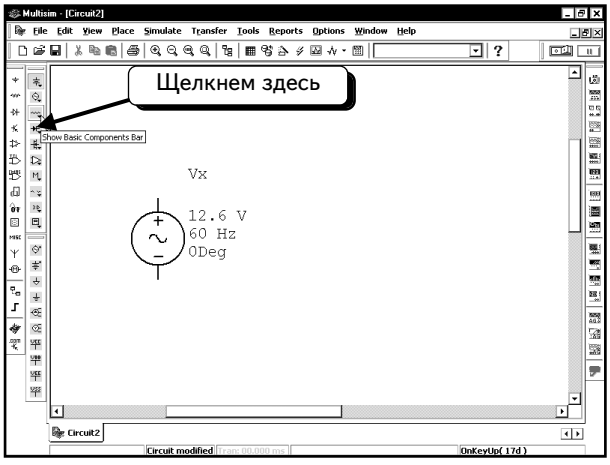
Поле названия источника уже выбрано, поэтому достаточно ввести новое название. Изменим название на **Vx**:

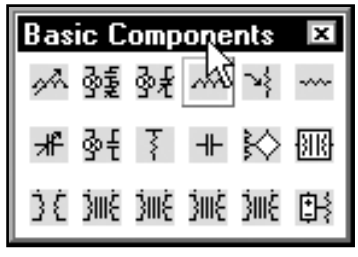


Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять все изменения. Изменения отобразятся на схеме:



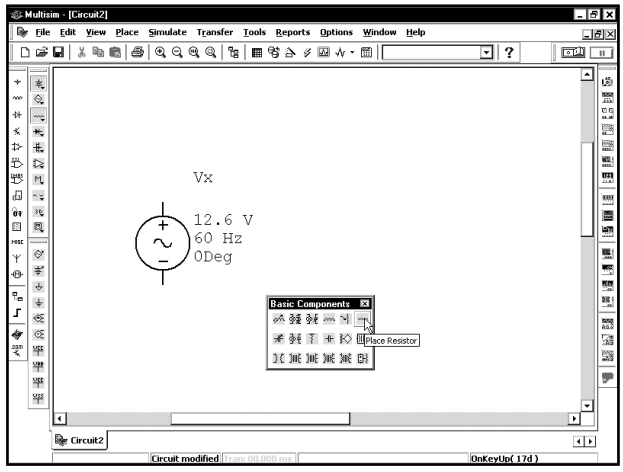
Теперь необходимо добавить в схему резисторы. Чтобы поместить резистор, нажмем кнопку **Show Basic Components Bar** :

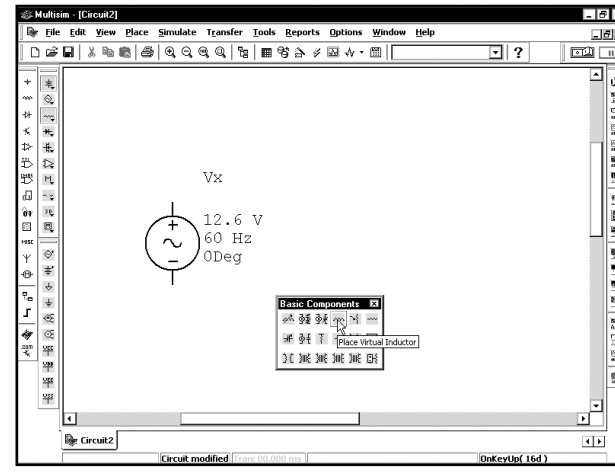




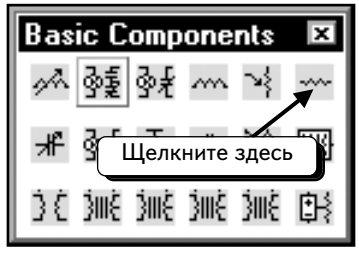
С помощью данной панели инструментов будем добавлять большинство пассивных компонентов, например, резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Эти компоненты называются виртуальными, они не обязательно должны иметь значения из стандартного ряда. К примеру, резистор может иметь значение 1,395 кОм, которое легко изменить. Существует другая панель, содержащая стандартные компоненты, значения которых изменять не так просто.

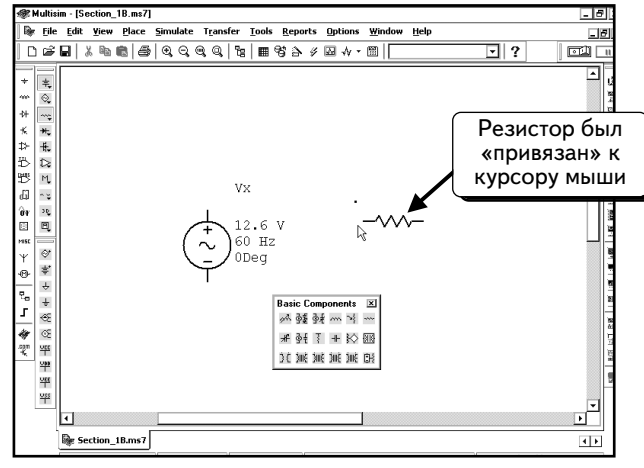
Чтобы определить функции кнопки, задержим на ней курсор мыши. Через несколько секунд появится экранная подсказка:



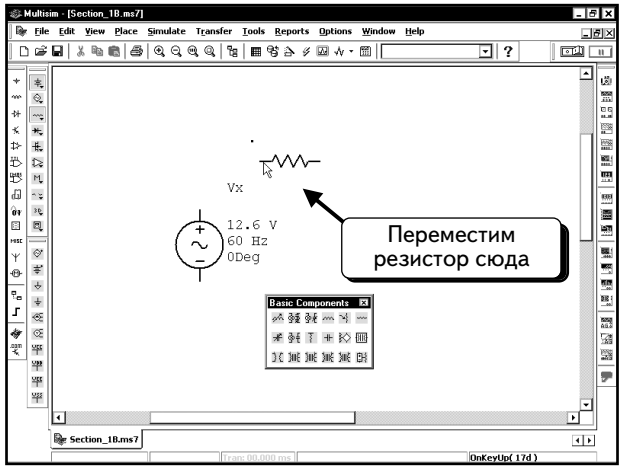


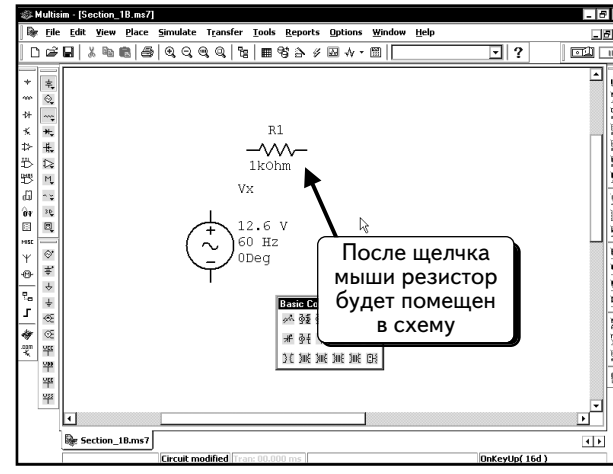
Нажмем кнопку **Place Resistor (Добавить резистор)** . Резистор будет «привязан» к курсору мыши:



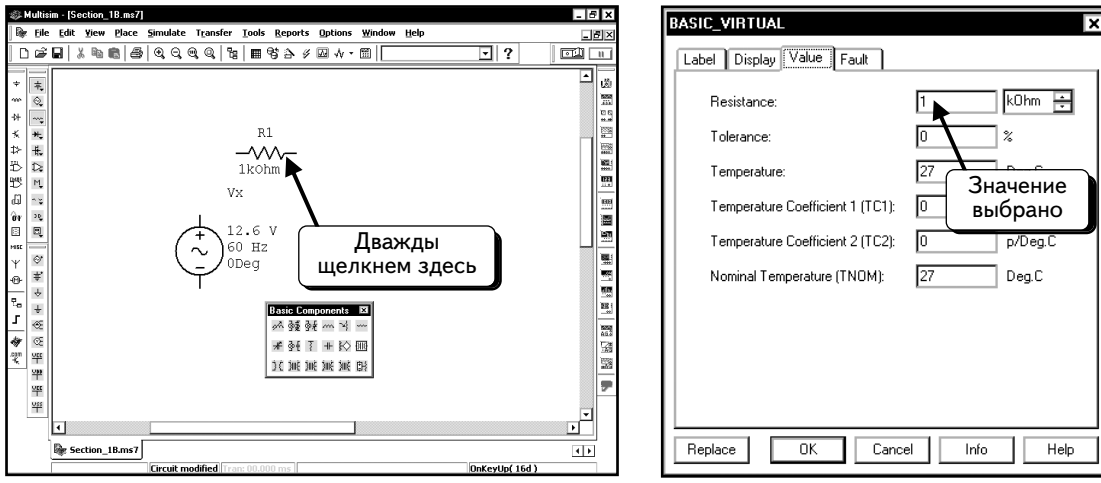


Поместим резистор так, как показано ниже, и нажмем ***ЛЕВУЮ*** кнопку мыши, чтобы добавить резистор в схему:

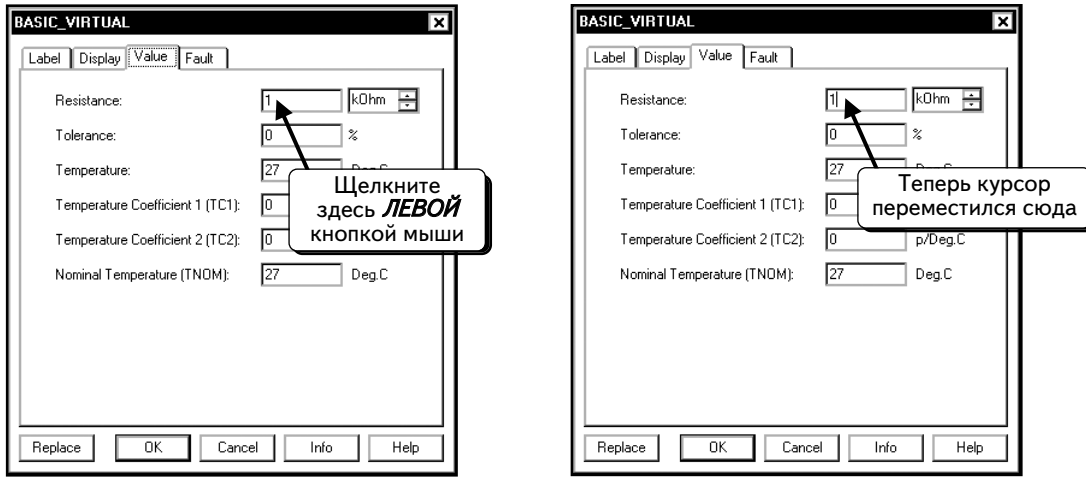




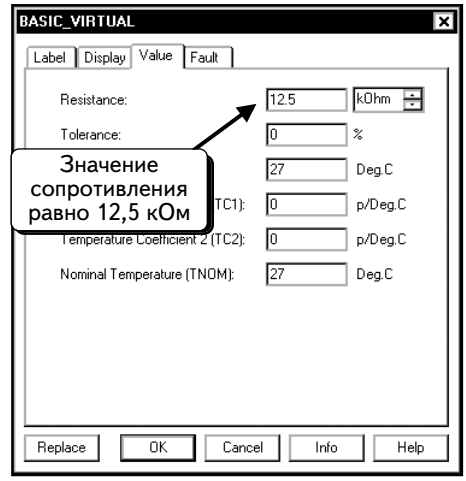
Теперь необходимо настроить резистор на сопротивление 12,5 кОм и изменить его название на **Rx**. Чтобы модифицировать параметры резистора, дважды щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по его иконке:



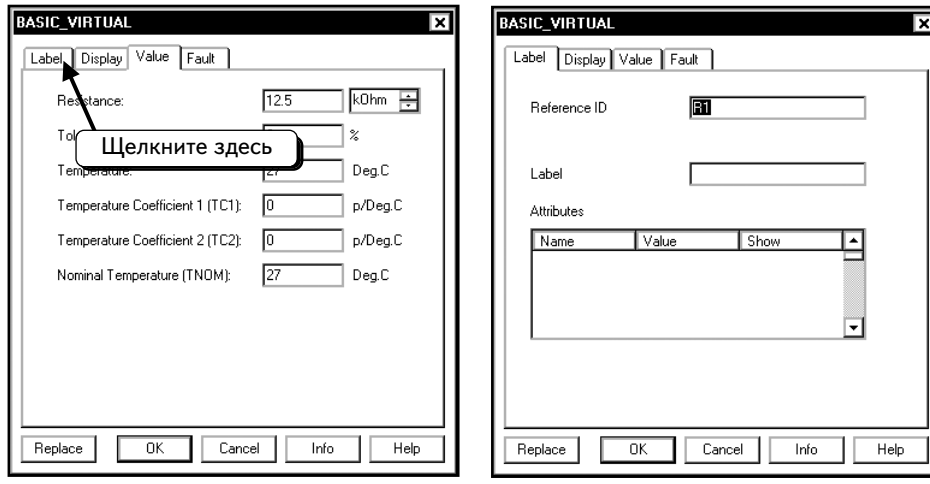
Появившаяся вкладка позволяет изменить сопротивление резистора, которое устанавливается так же, как и напряжение источника питания. Поместим курсор мыши в текстовое поле сопротивления и щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши:



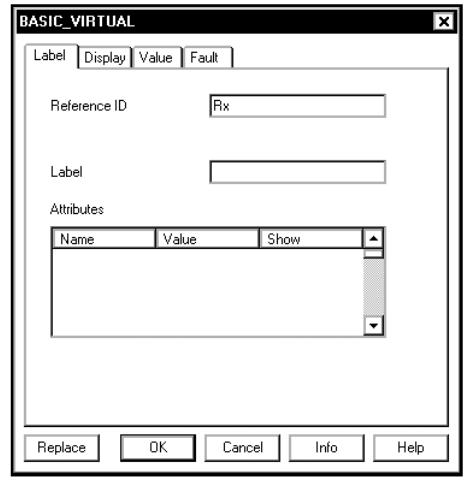
После этого введем значение **«12.5»**. Сопротивление резистора будет настроено на 12,5 кОм, так как в качестве единицы измерения выбраны килоомы (**kOhm**).



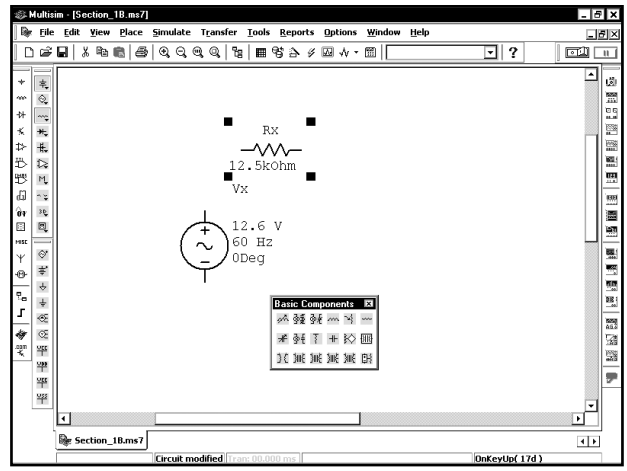
Чтобы изменить название резистора, выберем вкладку **Label**:



Сейчас для резистора используется название **R1**. После выделения названия, можно изменить его. Введем название **Rx**:

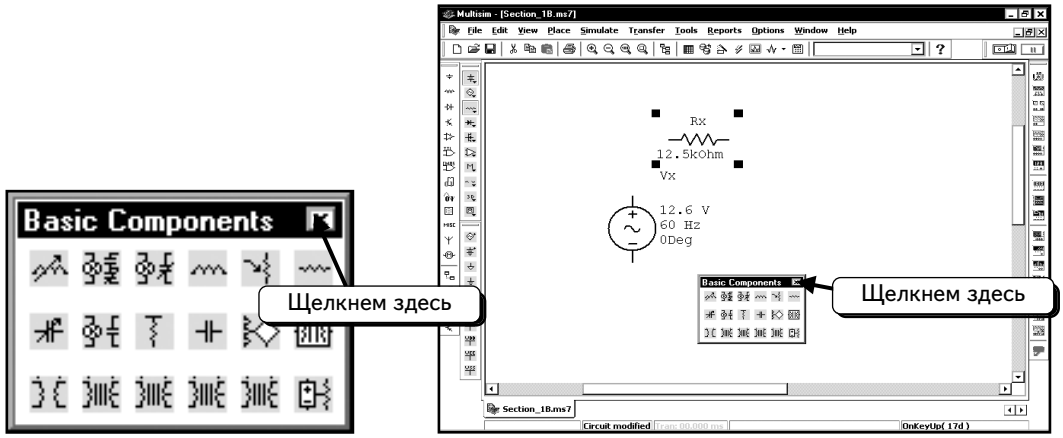


Завершив настройку параметров резистора, нажмем кнопку **OK**. Изменения будут отражены на схеме:

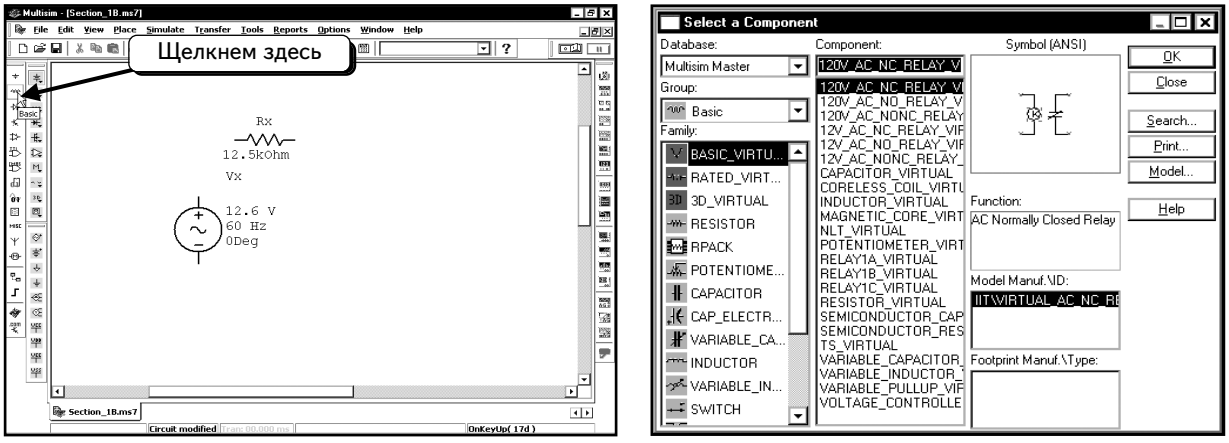


Если значения не совпали с показанными выше, повторно отредактируйте параметры устройства.

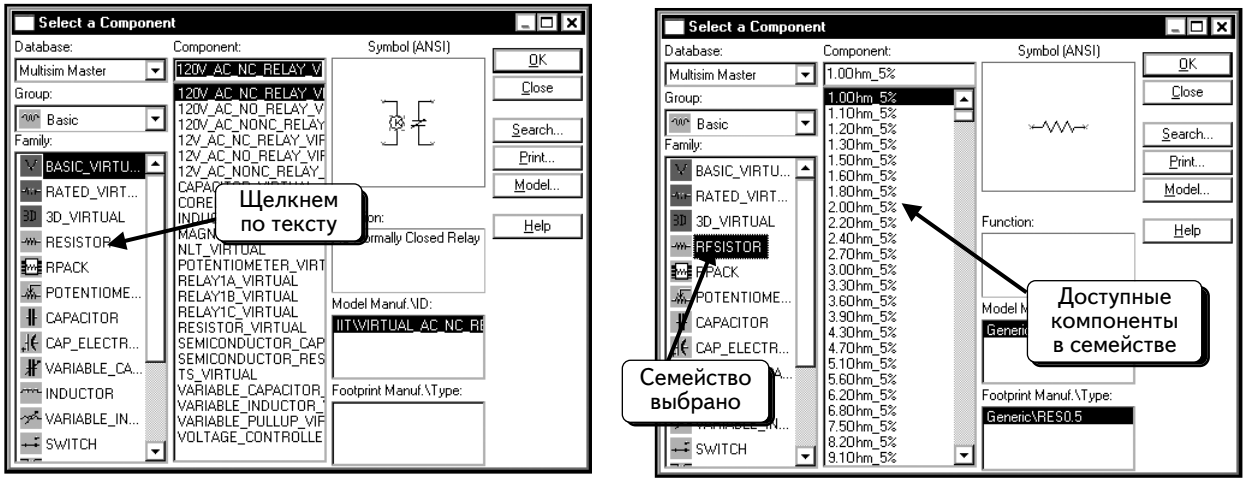
Далее нужно добавить стандартный резистор 12 кОм. Сначала щелкнем по символу ⊠, чтобы закрыть панель **Basic Components**:



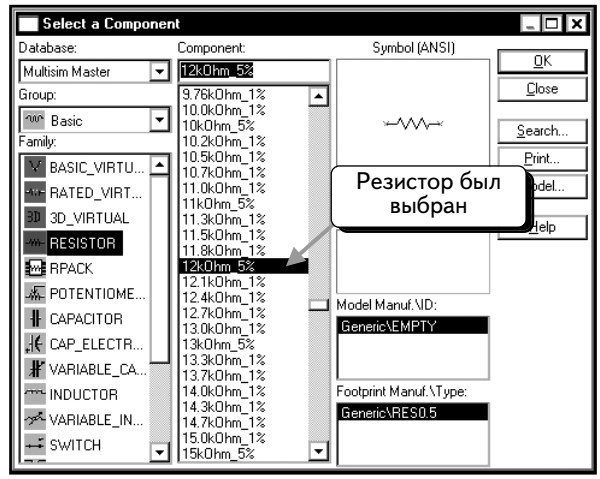
Нажмем кнопку ***Basic*** на панели инструментов **Components**:



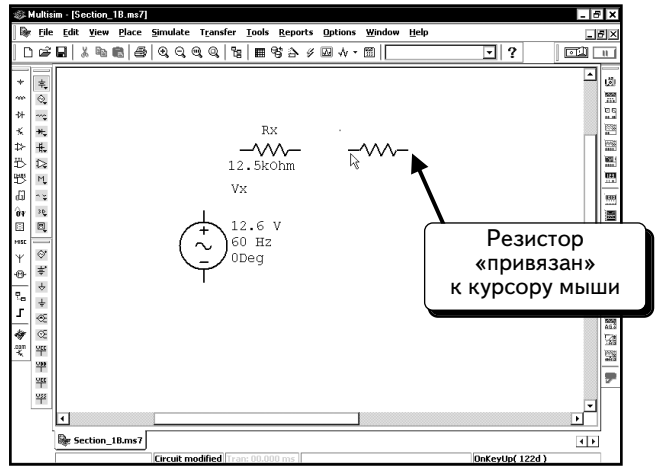
Щелкнем по пункту ***RESISTOR* (Резистор)**, чтобы выбрать семейство ***RESISTOR FAMILY***. Это семейство содержит все стандартные резисторы (с допусками 1 и 5 %) программы Multisim 7:



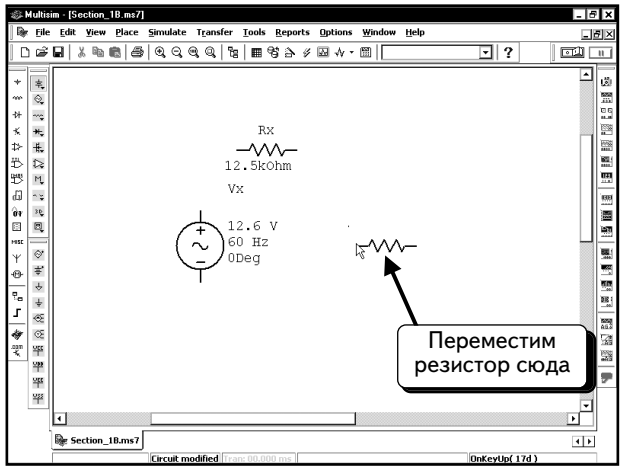
В списке имеются многие из тех резисторов (с допусками 1 и 5 %), которые можно купить. Просмотрим список и выберем нужный резистор. В нашем примере выбран резистор ***12 kOhm_5%***. Щелкнем по названию резистора, чтобы выбрать его:

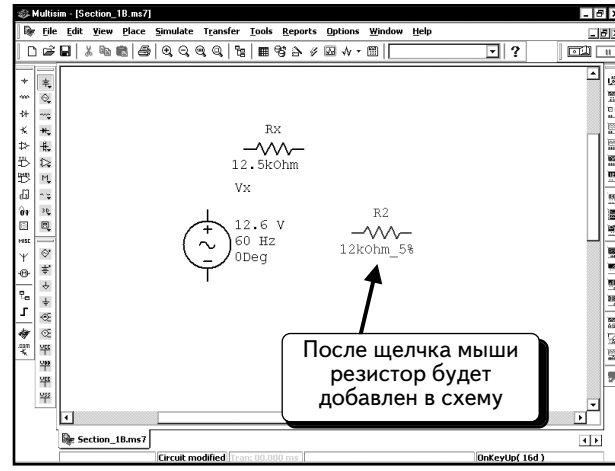


Когда вы нажмете кнопку **OK**, резистор будет «привязан» к курсору мыши:

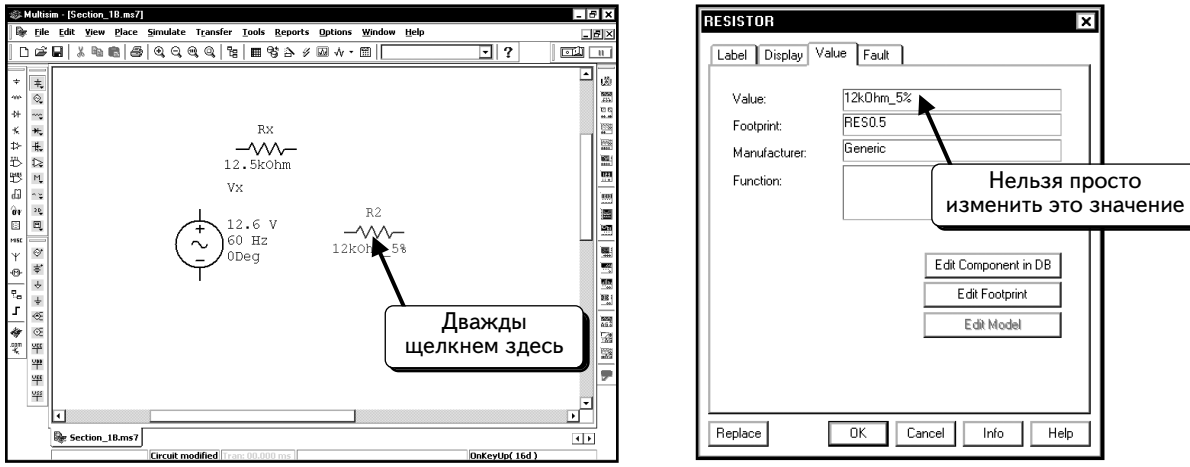


Поместим резистор так, как показано, и нажмем ***ЛЕВУЮ*** кнопку мыши, чтобы добавить резистор в схему:



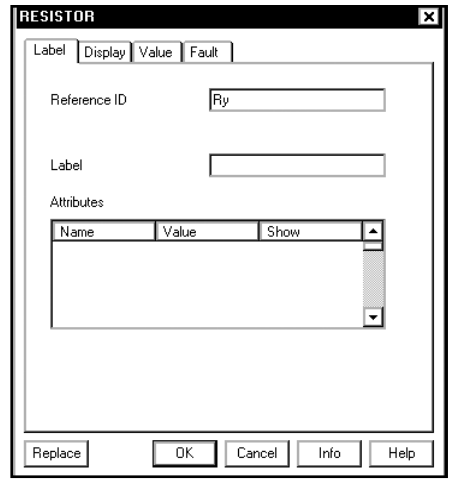


Обратите внимание: стандартный резистор обозначается синим цветом, а виртуальный — черным. Можно изменить параметры данного резистора так же, как и параметры виртуального резистора. Чтобы редактировать параметры резистора, дважды щелкнем по его иконке:

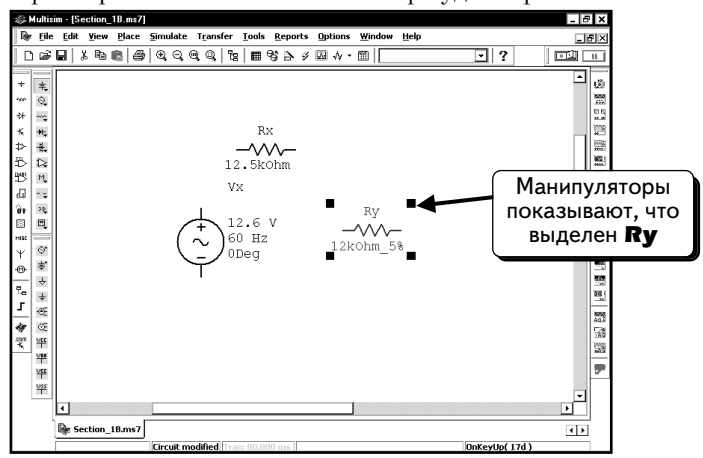


В отличие от виртуального резистора, процесс изменения сопротивления стандартного резистора не очевиден. Если нужно изменить значение, следует удалить резистор из схемы, а затем добавить новый резистор с правильным (стандартным) значением. Если планируется изменять настройки компонентов в схеме, то необходимо работать с виртуальными компонентами. Преимущество стандартных компонентов в том, что выбранный компонент наверняка можно найти в продаже.

С помощью диалогового окна можно изменить название резистора. Выберем вкладку **Label** и введем новое название (`Ry`):

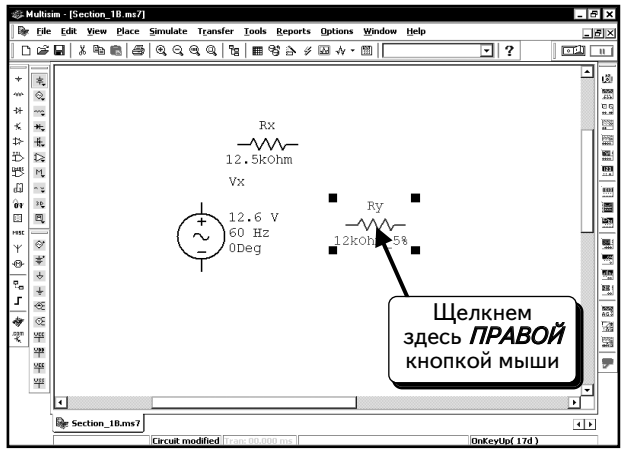


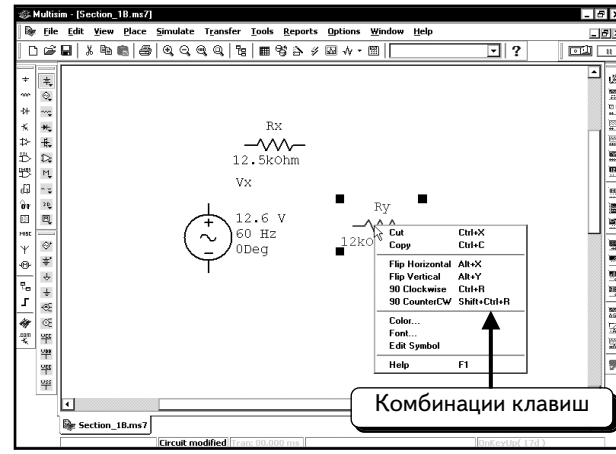
Нажмем кнопку **OK**, чтобы зафиксировать изменения. Резистор будет переименован:



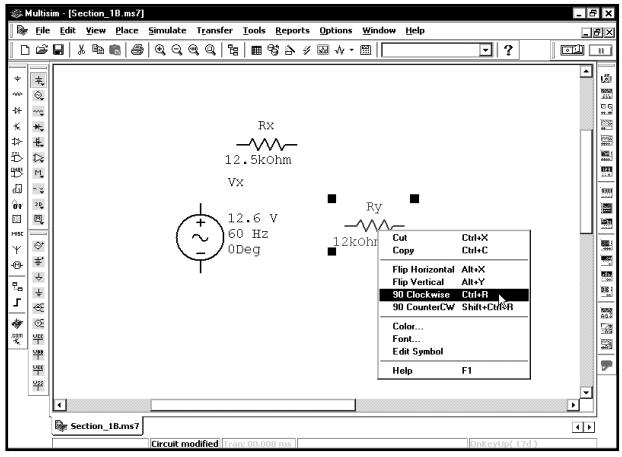
Теперь резистор **Ry** необходимо повернуть. Для этого щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по выделенному компоненту. На экране отображены манипуляторы, которые показывают, что выделен компонент **Ry**. Если компо-

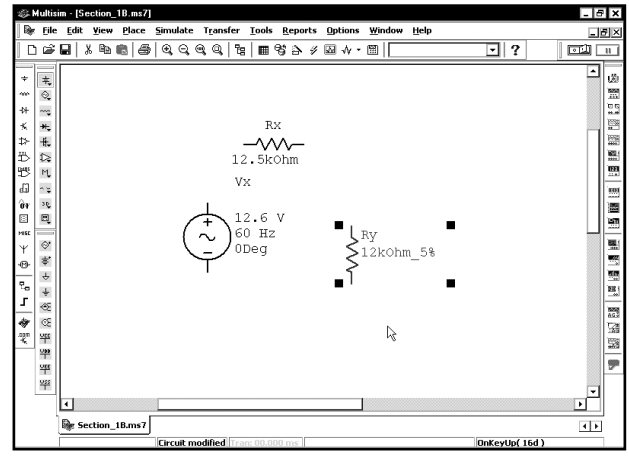
нент **Ry** не был выделен, щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по его иконке — появятся манипуляторы. После этого щелкнем по компоненту **Ry** ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши — отобразится меню:



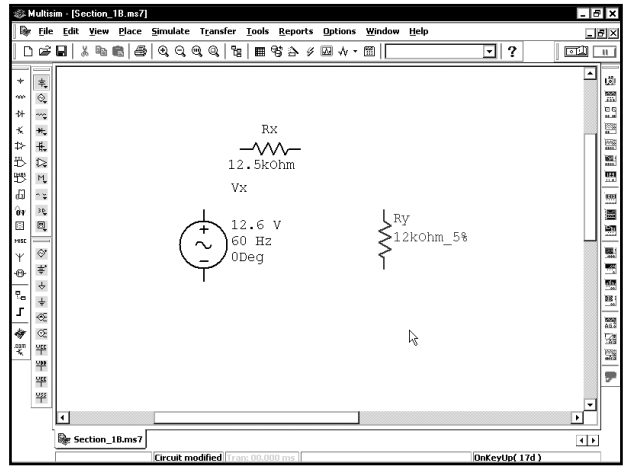


Это меню предлагает несколько опций для вращения и изменения положения компонентов. Можно повернуть компонент по часовой стрелке или против нее и воспользоваться командой **CTRL+R** или **SHIFT+CTRL+R**. Выберем опцию **90 Clockwise (На 90° по часовой стрелке)**:



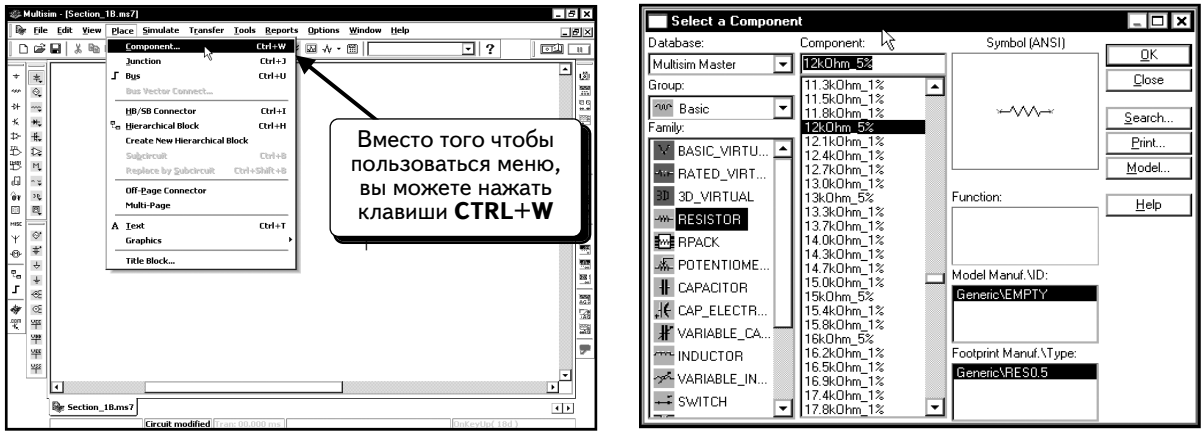


Теперь компонент повернут нужным образом. Передвинем немного резистор, так как при вращении он должен сместиться:



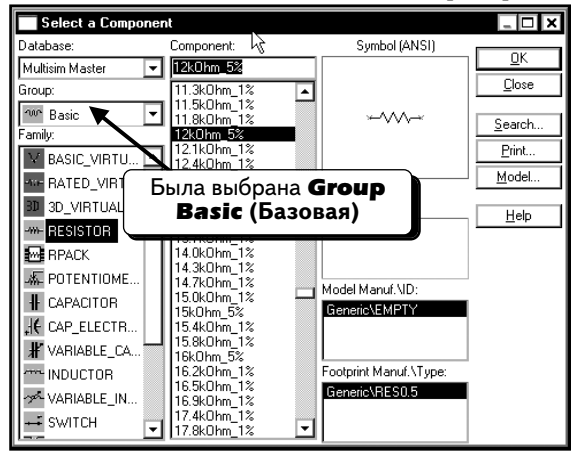
Для добавления следующего резистора используем меню. Этот метод аналогичен применению панели инструментов **Component**, за исключением того, что мы будем работать с виртуальным, а не со стандартным ре-

зистором. Хотя этот способ требует выполнения большего количества действий, мы хотели продемонстрировать вам все возможные методы добавления компонентов. В данном случае мы работаем с виртуальным резистором, но этот метод используется для добавления любых компонентов. Выберем в меню пункты **Place ⇒ Component (Добавить ⇒ Компонент)** либо нажмем клавиши **CTRL+W**:

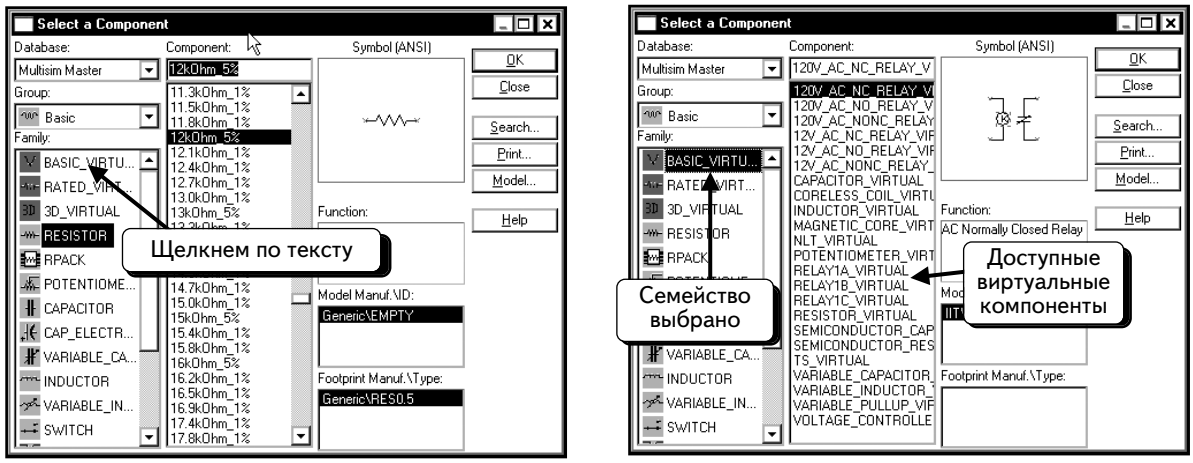


В меню отображается последний добавленный компонент. Можно найти нужный компонент самостоятельно. Местонахождение компонента не всегда очевидно, и поиск может занять некоторое время.

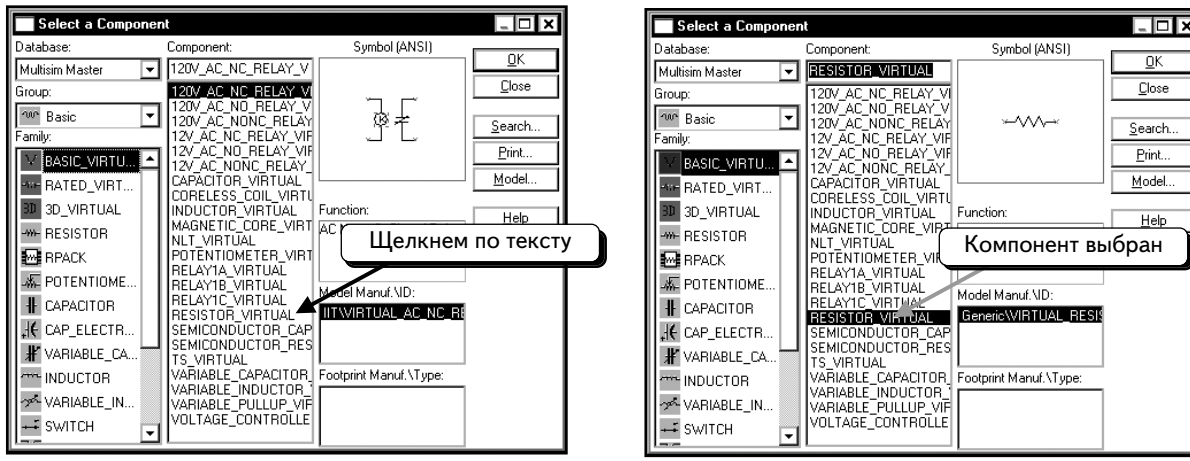
Добавим виртуальный резистор, который находится в группе **BASIC_VIRTUAL**. В диалоговом окне сейчас выбрана **Group Basic** (включающая последний компонент, с которым работали):



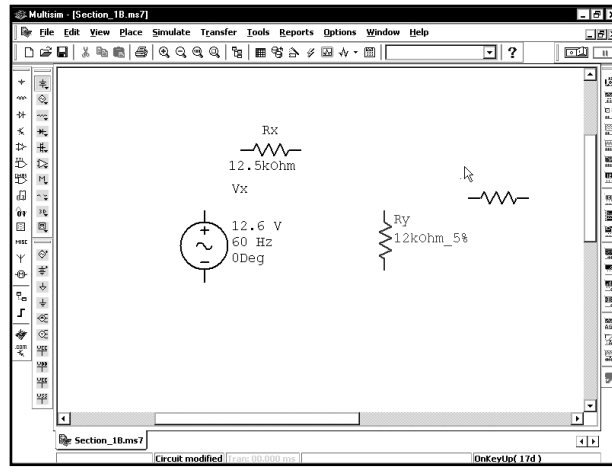
Если в вашем диалоговом окне не выбрана эта группа, выделите ее. Виртуальные компоненты находятся в семействе **BASIC_VIRTUAL**. Щелкнем по пункту **BASIC_VIRTUAL** и выберем семейство:



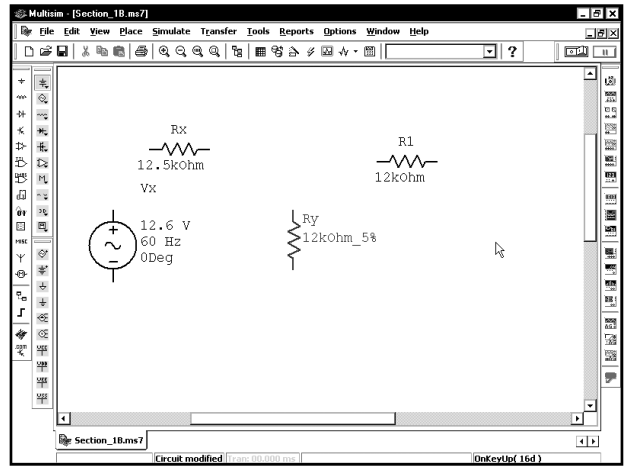
Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по пункту **RESISTOR_VIRTUAL**, чтобы добавить резистор :



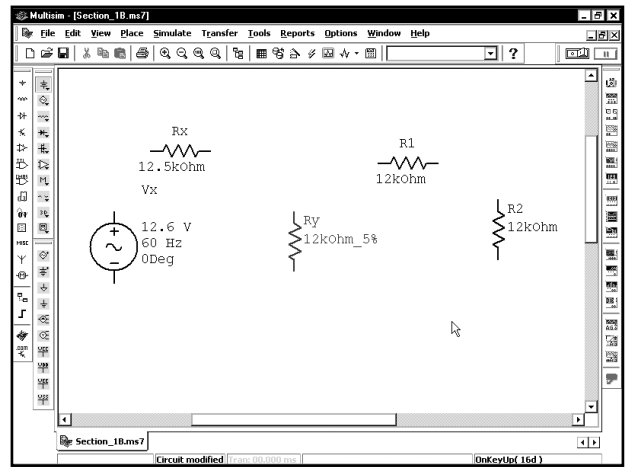
Этот резистор относится к тому же типу, что и первый из добавленных нами в схему. Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить новый резистор. Резистор будет «привязан» к курсору мыши:



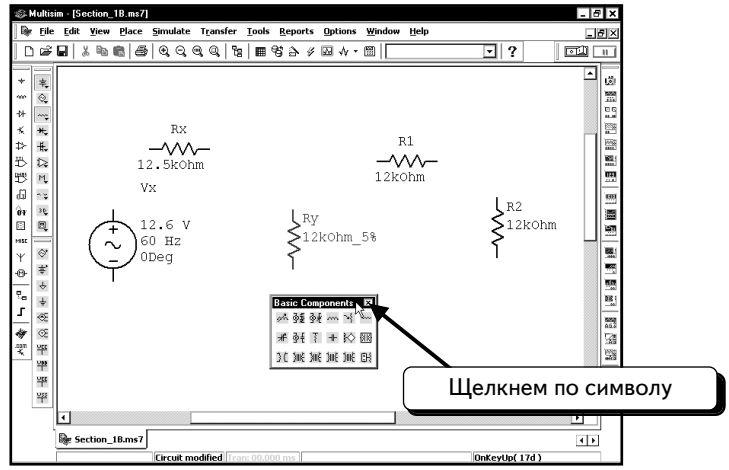
Поместим резистор так, как показано ниже, изменим значение сопротивления на 12 кОм и введем для резистора название (R1):



Воспользуемся одной из вышеописанных методик, чтобы добавить в схему четвертый резистор.



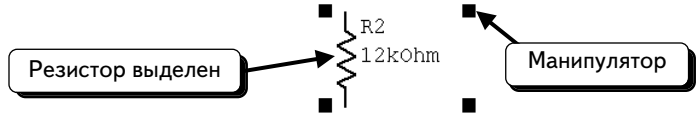
Изменим названия и настройки для резисторов, как показано. Если панели инструментов открыты, закроем их, щелкнув по символу ⊠ в верхнем правом углу:



1.3. Исправление ошибок

Расположение компонентов в вашей схеме может отличаться от желаемого. Для перемещения компонентов воспользуемся нижеописанной процедурой. Предположим, что вы хотите переместить резистор.

1. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по иконке резистора. Он будет выделен с помощью манипуляторов:



Выделение резистора может потребовать нескольких попыток. Выделите резистор, а не его значение или название :

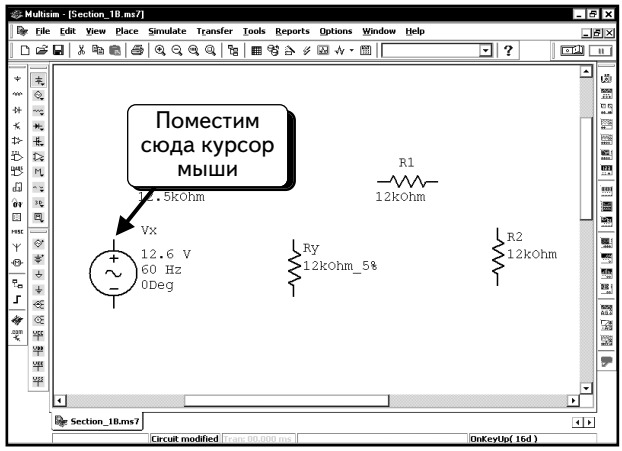


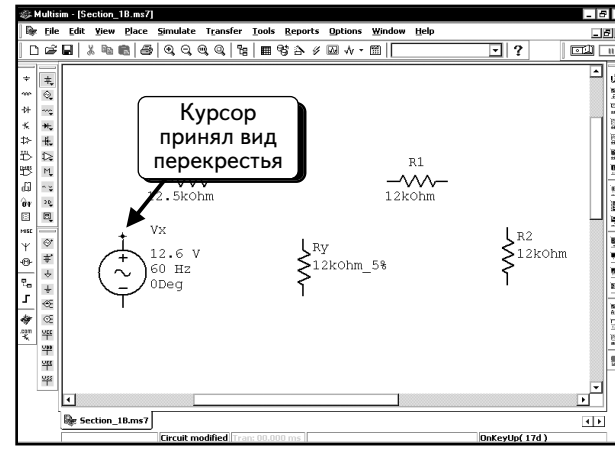
2. Выделив резистор, переместим его условное изображение в нужное место на схеме.

Если надо удалить компонент, выполним сначала действия, описанные в пункте 1, и после выделения компонента нажмем клавишу **DELETE**.

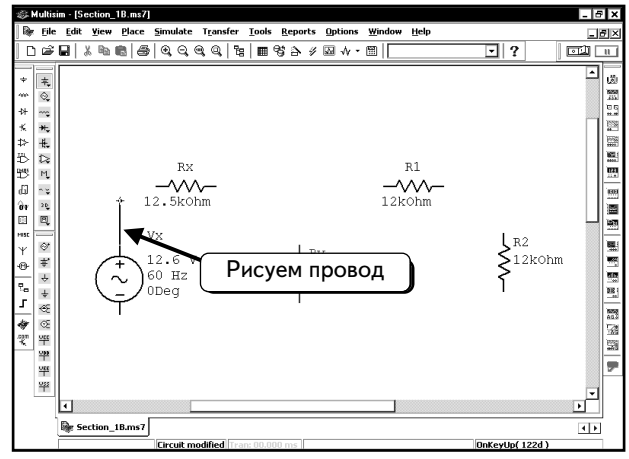
1.4. Подключение компонентов

Теперь следует соединить компоненты проводами. Поместим курсор мыши на полюс источника напряжения. При приближении к полюсу курсор мыши будет заменен символом в виде перекрестья:

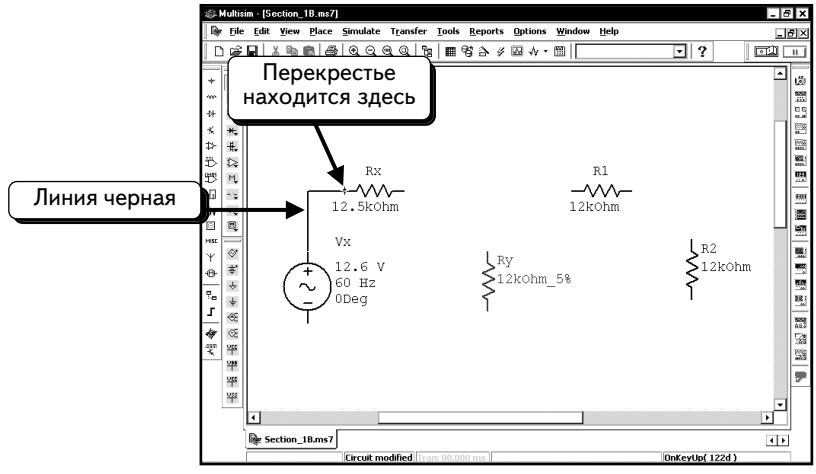




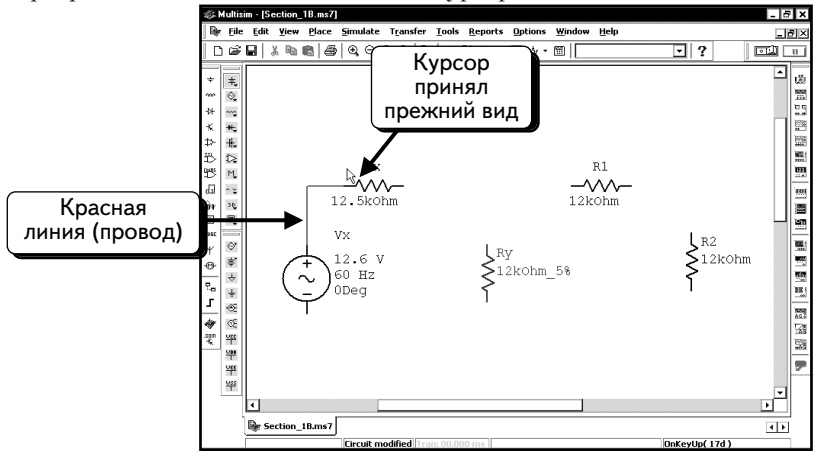
Мы готовы добавить провод. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши и переместим курсор. Мы заметим, что при его перемещении за перекрестьем тянется черная линия:



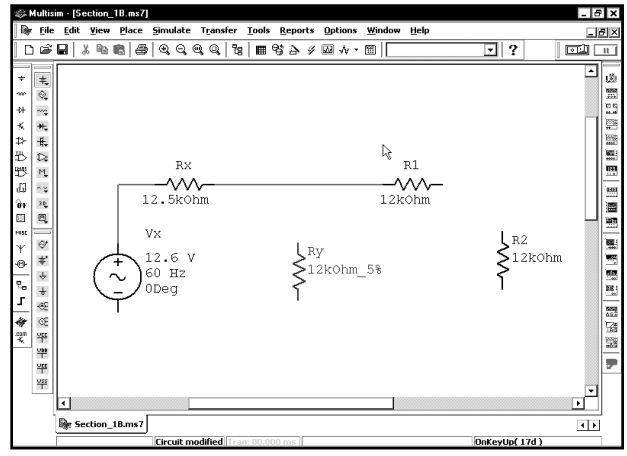
Если нет необходимости подводить провод к выбранному полюсу, нажмем клавишу **ESC**, и черная линия исчезнет. Если же необходимо продолжить, то переместим курсор к левому полюсу резистора **Rx**:



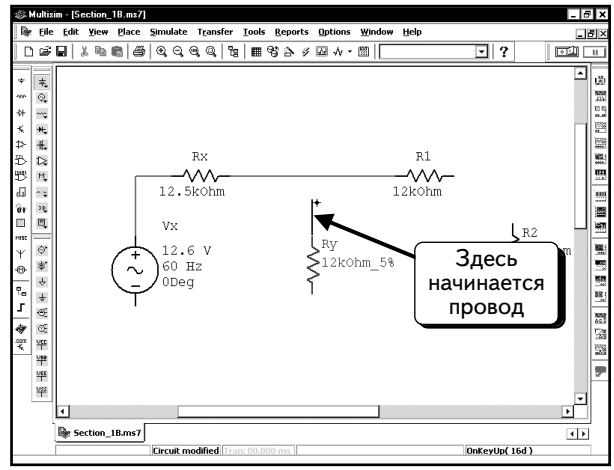
Обратите внимание: если линия по-прежнему черная, это значит, что она пока не является проводом. Если нажать клавишу **ESC**, то черная линия исчезнет и провода не будет. Поместив курсор мыши так, как показано выше, щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы создать провод. Черная линия станет красной (это значит, что был добавлен провод, который соединяет два компонента). При перемещении курсора мыши от провода видно, что символ в виде перекрестья снова заменен обычным курсором мыши:



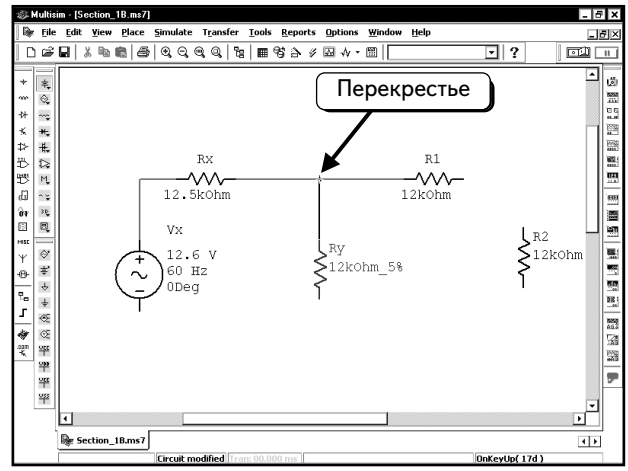
С помощью этой методики соединим компоненты **Rx** и **R1**.



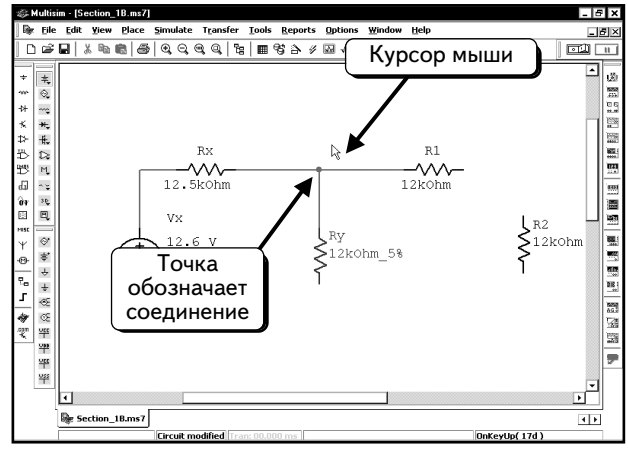
Теперь необходимо подключить компонент **Ry**, создав узел между **Rx** и **R1**. Поместим курсор мыши на верхний полюс компонента **Ry** и щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы начать тянуть черную линию:



Переместим перекрестье на провод между компонентами **Rx** и **R1**:

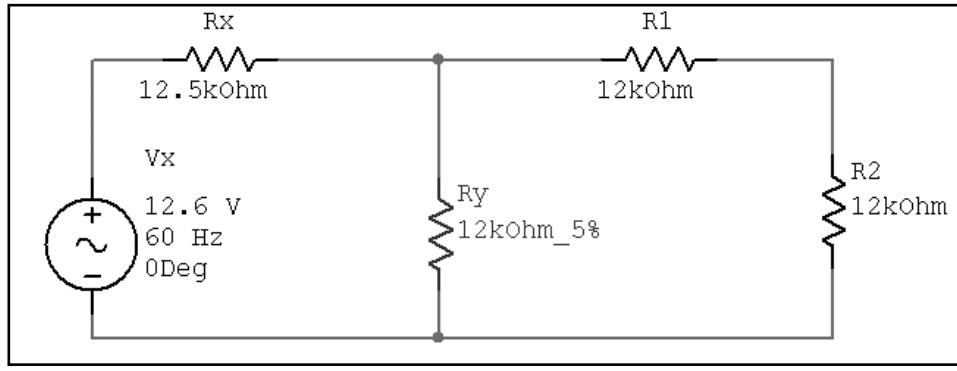


Затем щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши. Черная линия станет красной, показывая, что создан провод. При перемещении курсора мыши видно, что символ в виде перекрестья заменен обычным курсором мыши, а в месте соединения появилась точка:



Точка используется для обозначения узла (соединения двух проводов). Если точка отсутствует, значит, провода не соединены.

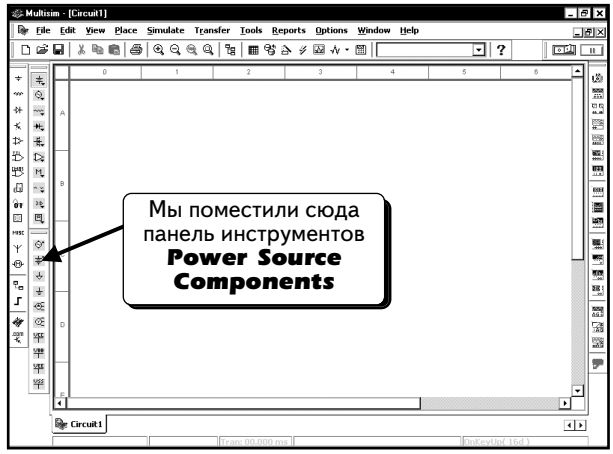
Подключим компоненты схемы так, как показано ниже:



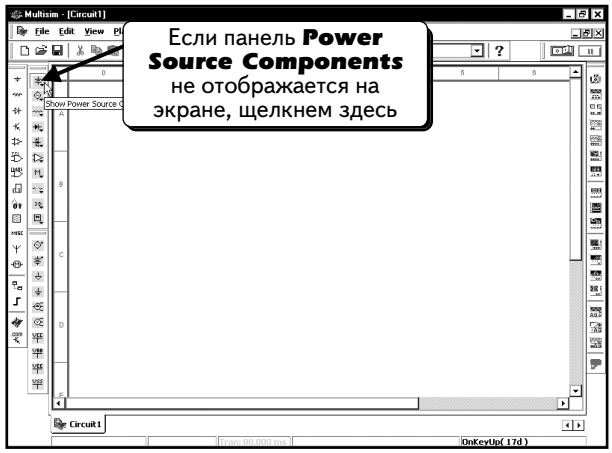
1.5. Заземление схемы

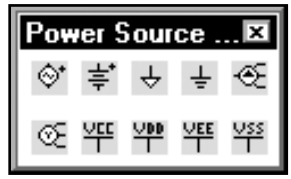
Для моделирования схемы в программе Multisim необходимо подключить к ней хотя бы одно заземление. В программе Multisim доступны два символа заземления: символ обычного заземления ( ) и символ заземления цифровых схем ( ). Обычный символ заземления используется в любых процессах моделирования, за исключением моделиро-

вания цифровых устройств в реальном режиме. Обычное заземление может применяться при цифровом моделировании в реальном режиме (см. раздел 7.5). Обычное заземление используется во всех примерах данной книги, не относящихся к цифровому моделированию в реальном режиме. Если есть сомнение, относится ли ваш пример к последнему случаю, выберите обычный символ заземления ( ). Оба символа заземления расположены на панели инструментов ***Power Source Components.*** Ранее в этой главе панель инструментов была помещена на краю экрана:

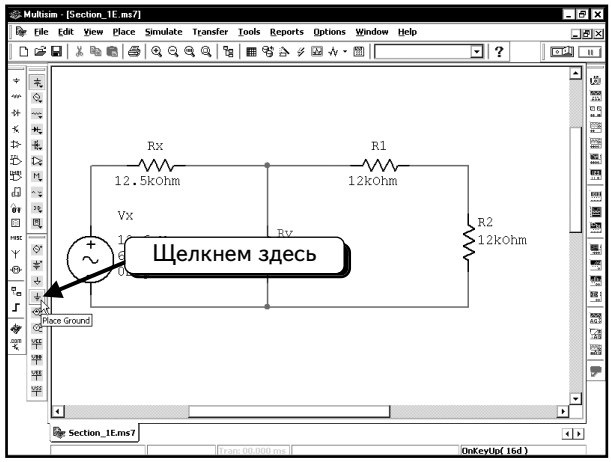


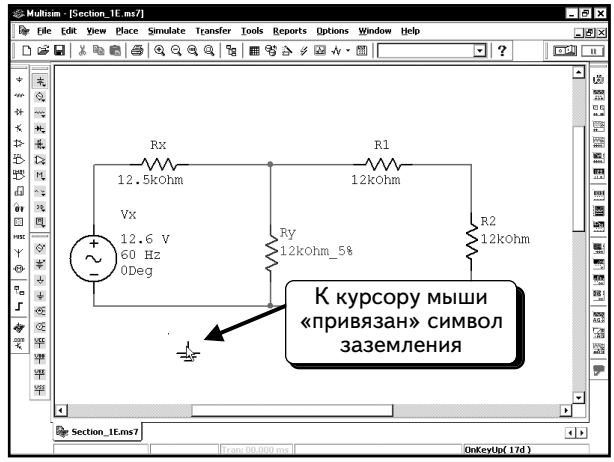
Если панель инструментов ***Power Source Components*** скрыта, нажмем кнопку ***Show Power Source Components Bar***, чтобы она появилась на экране:



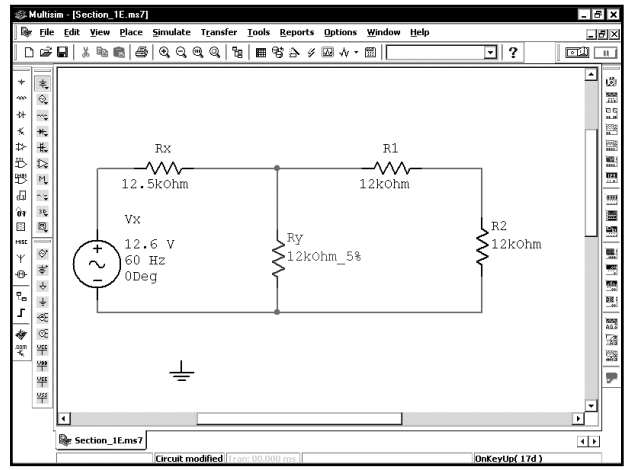


Затем, нажмем кнопку ***Place Ground*** **(Добавить заземление)** . Символ заземления будет «привязан» к курсору мыши:

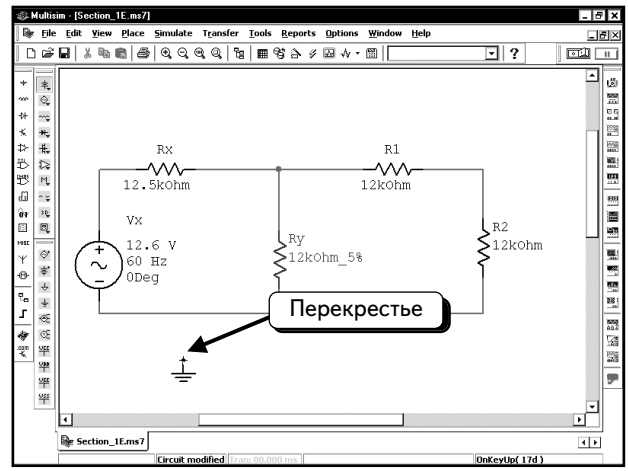




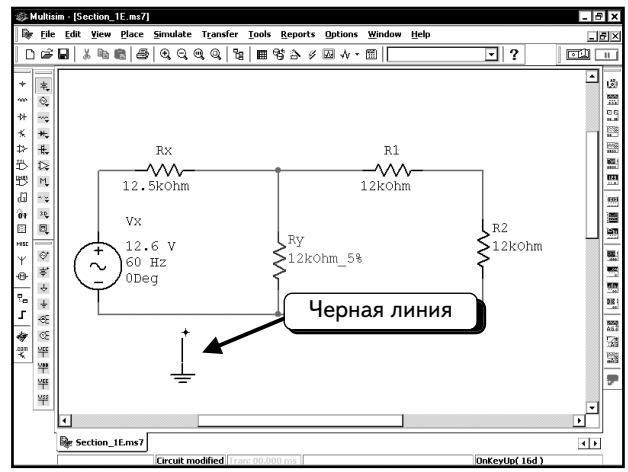
Переместим компонент, как показано выше, и щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши:



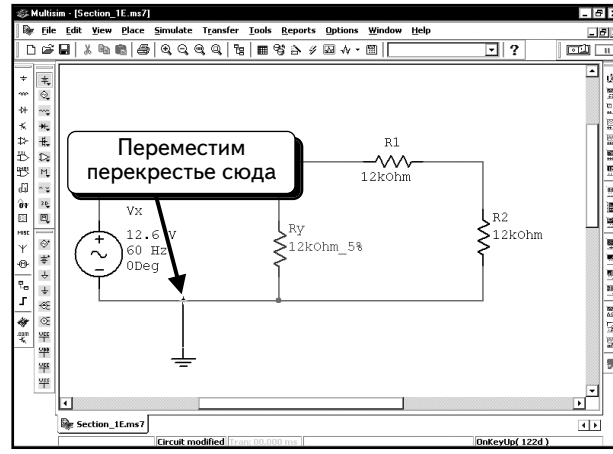
Теперь надо подключить заземление к схеме. Поместим курсор мыши на полюс заземления. Курсор мыши примет форму перекрестья:



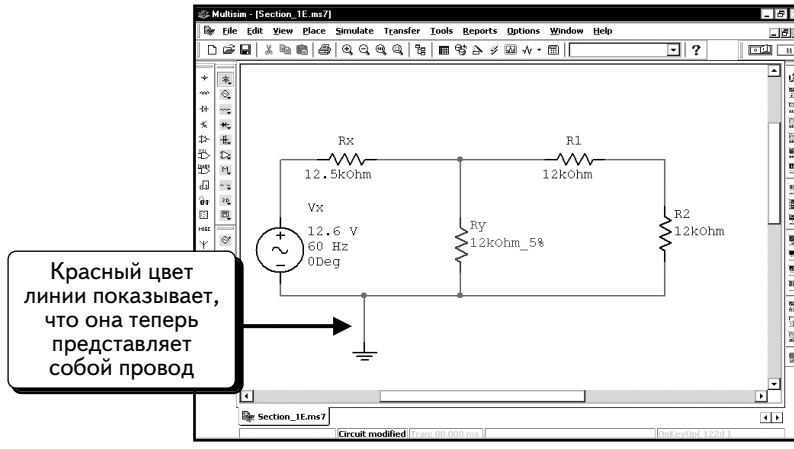
Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши и начнем тянуть черную линию:



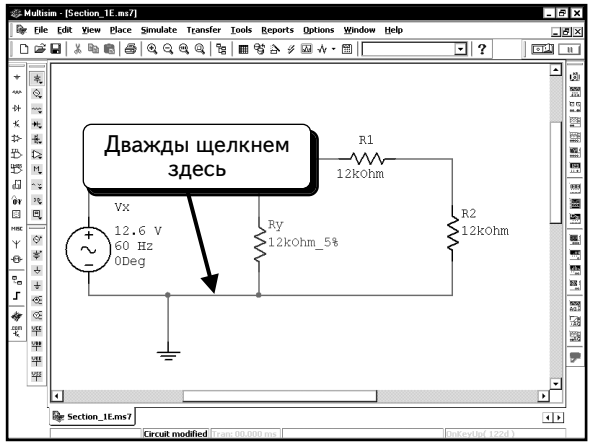
Переместим перекрестье на провод так, как показано:

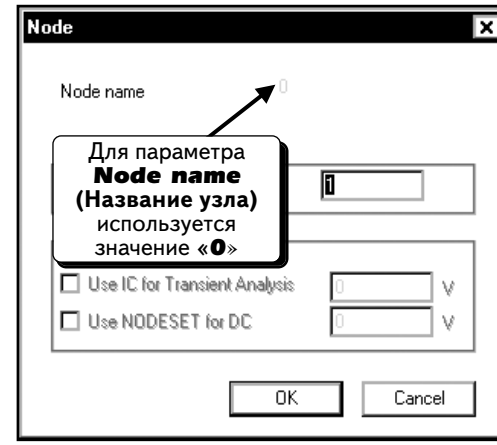


Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы создать соединение. Черная линия станет красной, это значит, что создан провод.



Обратите внимание: при использовании общего символа заземления ( ) узлу присваивается название (**0**). Если дважды щелкнуть по проводу, подключенному к узлу заземления, то можно увидеть название узла «нуль» (**0**):





При моделировании SPICE для узла заземления используется стандартное название «нуль» (**0**), причем все схемы должны содержать хотя бы один такой узел. При использовании цифрового символа заземления ( ) узлу присваивается название «**GND**», а не «**0**».

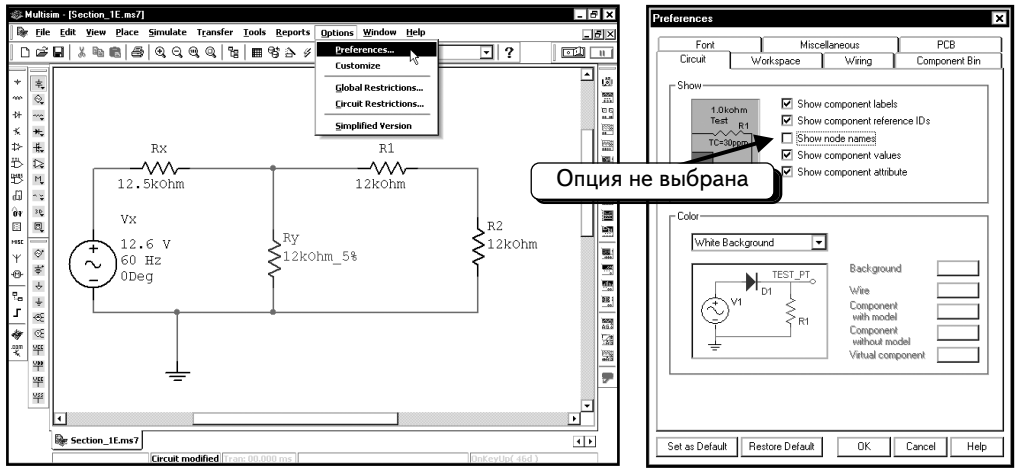
1.6. Удаление провода при ошибочном подключении

Если при подключении была допущена ошибка и необходимо удалить провод, то нужно выполнить следующие операции:

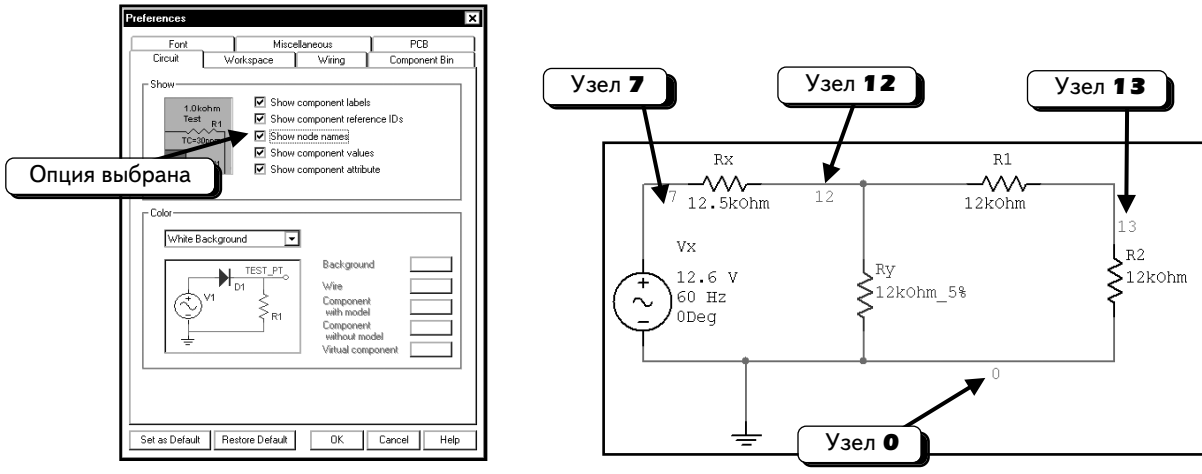
1. Поместить курсор мыши на этот провод.
2. Щелкнуть ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши. Провод будет выделен.
3. Нажать клавишу **DELETE**, чтобы удалить провод.

1.7. Разметка узлов

Программа Multisim автоматически нумерует узлы. При моделировании в SPICE необходимо знать названия узлов, чтобы правильно отображать диаграммы. Перед тем как вводить названия узлов, выберем опцию, которая покажет их на схеме. Выберем в меню Multisim пункты **Options** ⇒ **Preferences**:

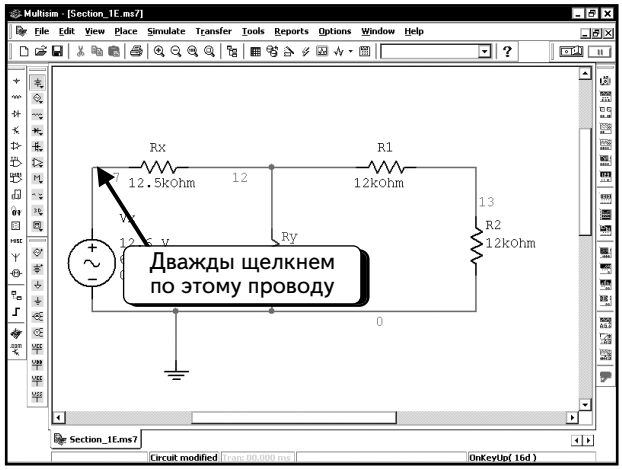


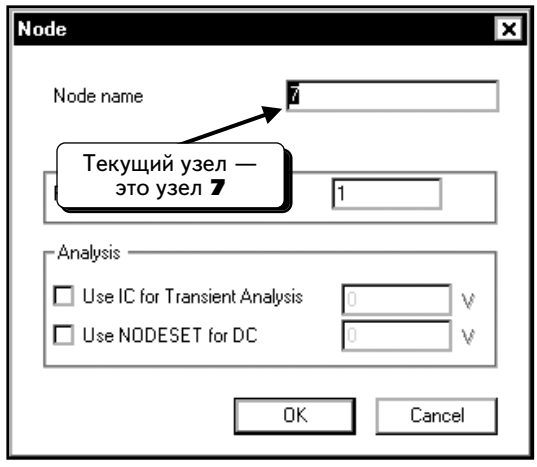
По умолчанию названия узлов не отображаются на схеме. Нам необходимо отобразить названия узлов, поэтому выберем указанную выше опцию и нажмем кнопку **OK**:



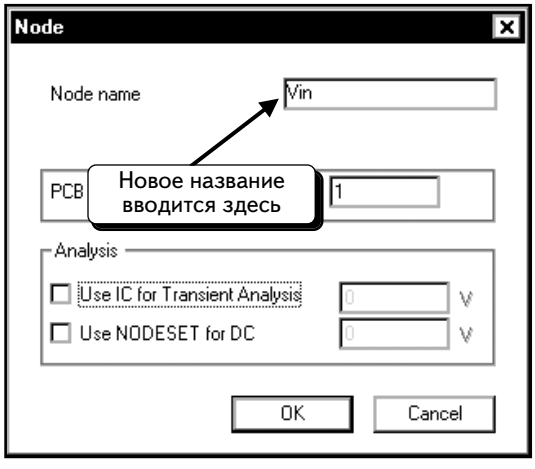
Теперь на схеме появились номера узлов. Названия узлов в вашей схеме будут отличаться. Если изменить схему, названия узлов тоже изменятся. Нумерация выполняется по порядку, но вам будет сложно связать названия узлов с определенными компонентами. Задача упростится, если разметить узлы самостоятельно.

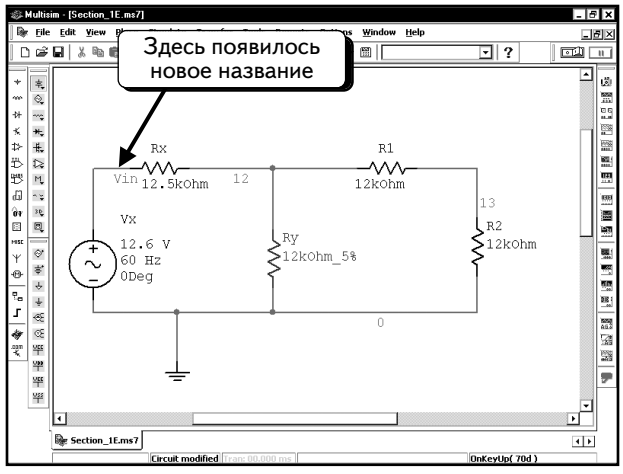
Чтобы переименовать узел, дважды щелкнем по проводу, который к нему подключен. Переименуем, например, ***ЛЕВЫЙ*** узел, присвоив ему имя «**Vin**». Дважды щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, как показано ниже:



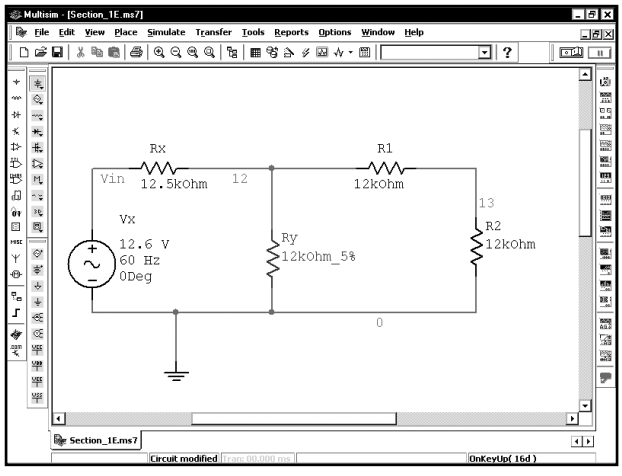


Как видим, текущий узел имеет имя (номер) **7**. Так как он выделен, можно заменить его другим именем. Введем текст «**Vin**» и нажмем кнопку **OK**. На схеме отобразится новое название узла:





Переименуем центральный узел в **V_mid**, а правый узел — в **Vout**.

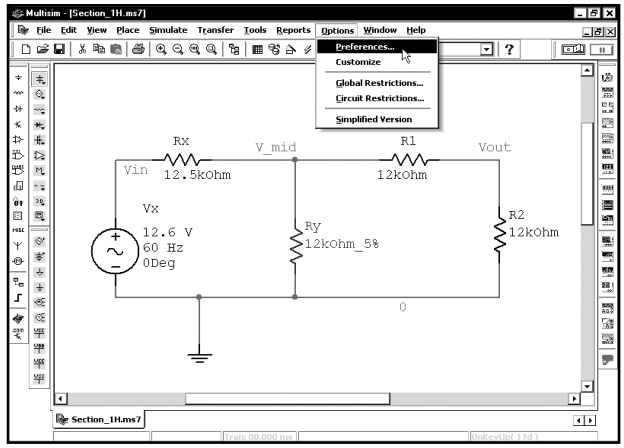


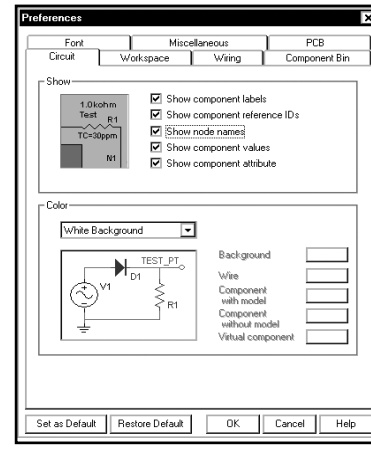
При изменении названий узлов параметры моделирования сохраняются. Этот процесс только упрощает работу с функцией Postprocessor (см. главу 2). Названия узлов не должны содержать пробелов.

Завершив работу со схемой, сохраним ее. Выберем в меню пункты **File ⇒ Save (Файл ⇒ Сохранить)**, нажмем клавиши **CTRL+S** или кнопку **Save** на панели инструментов.

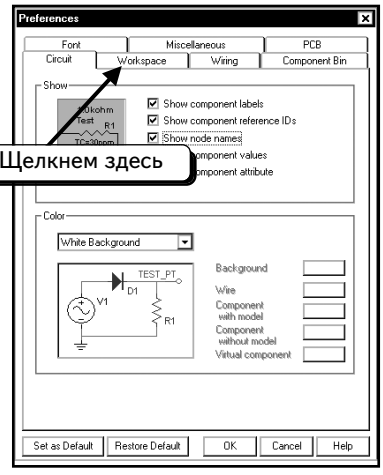
1.8. Вывод и модификация блока заголовка (штампа)

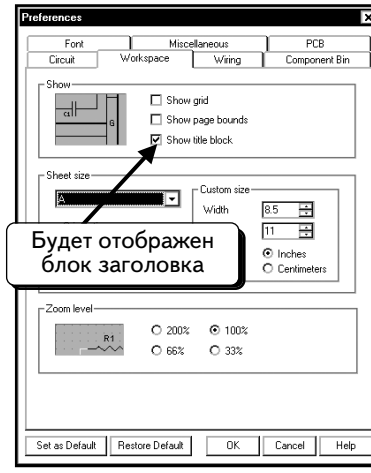
Блок заголовка содержит такую информацию о проекте, как его название, имя автора, имя редактора, дату последнего изменения, количество страниц и так далее. В данном примере нам достаточно ввести название проекта, имя автора и класс. Чтобы отобразить блок заголовка, выберем в меню пункты **Options ⇒ Preferences**:





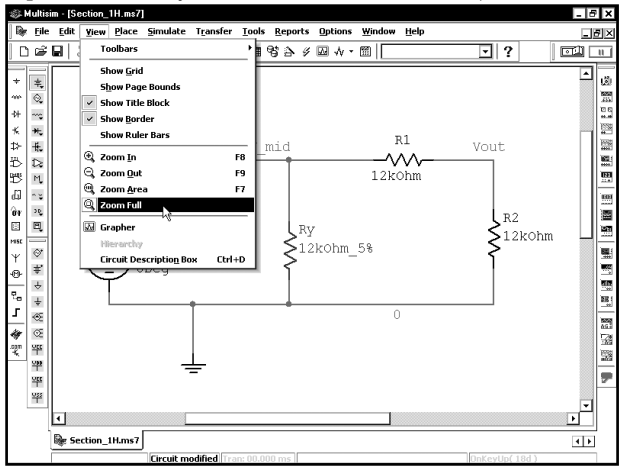
Щелкнем по вкладке **Workspace (Рабочее пространство)**:

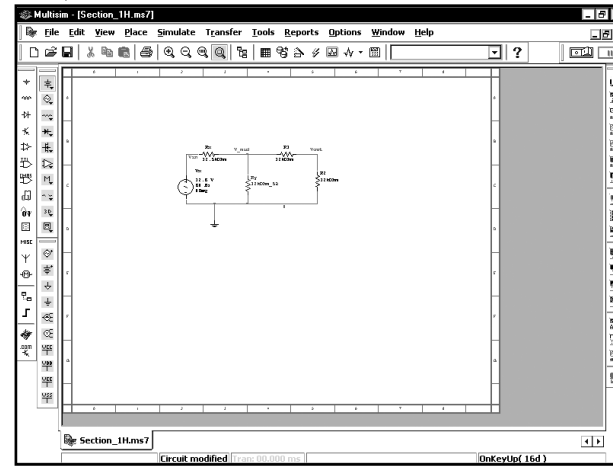




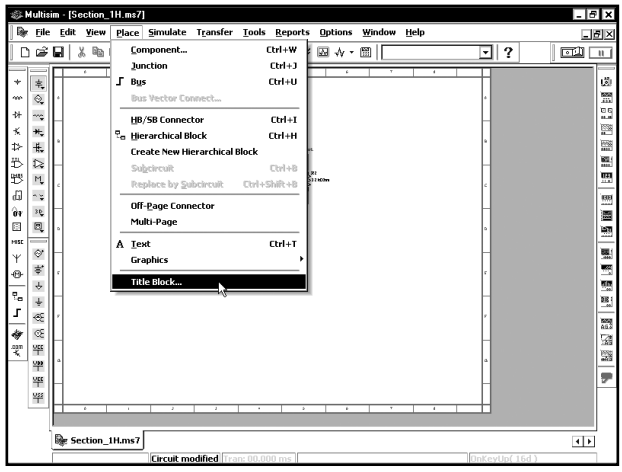
По умолчанию блок заголовка должен появляться на рисунке. Если опция неактивна, включим ее и нажмем кнопку **OK**, после чего блок заголовка появится на рисунке, если он создан.

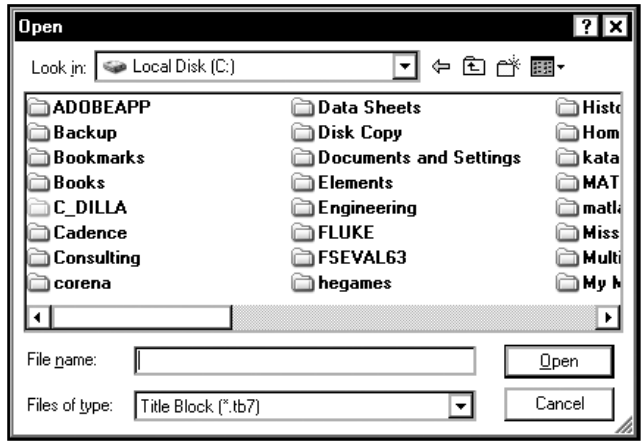
Чтобы создать блок заголовка в нашей схеме, нужно изменить масштаб и отобразить страницу целиком. Выберем в меню пункты **View ⇒ Zoom Full (Вид ⇒ Вся страница)**:



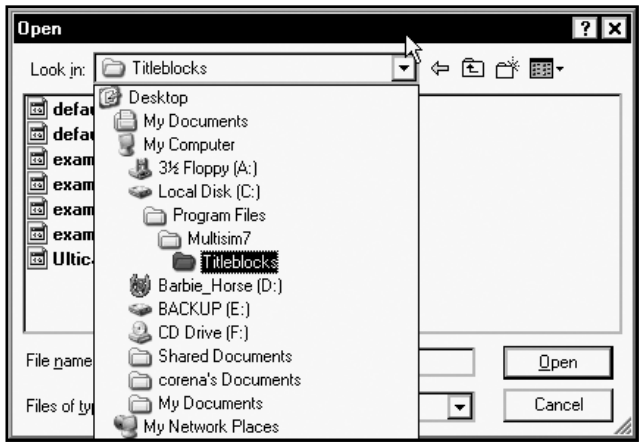


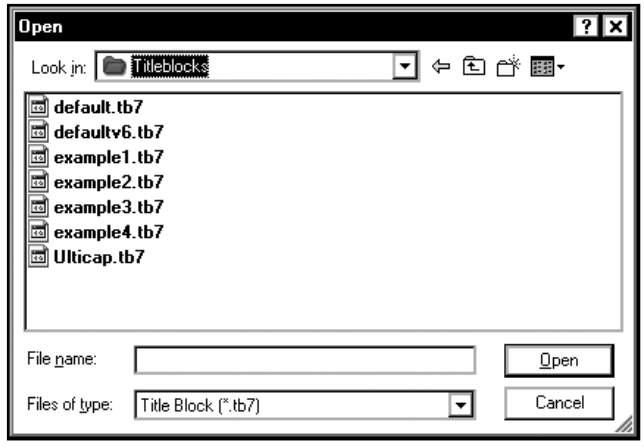
Затем выберем в меню пункты **Place ⇒ Title Block (Поместить ⇒ Блок заголовка)**:



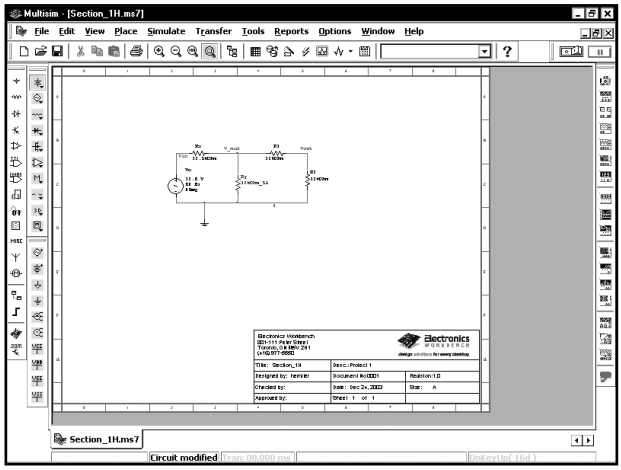


В программе Multisim 7 блоки заголовков хранятся в файлах с расширением .tb7. Если установить программу в папку по умолчанию, эти файлы будут находиться в папке C:\Program Files\Multisim7\Titleblocks:

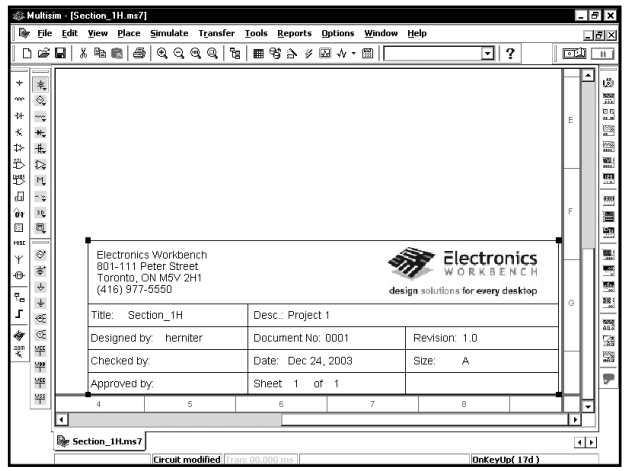




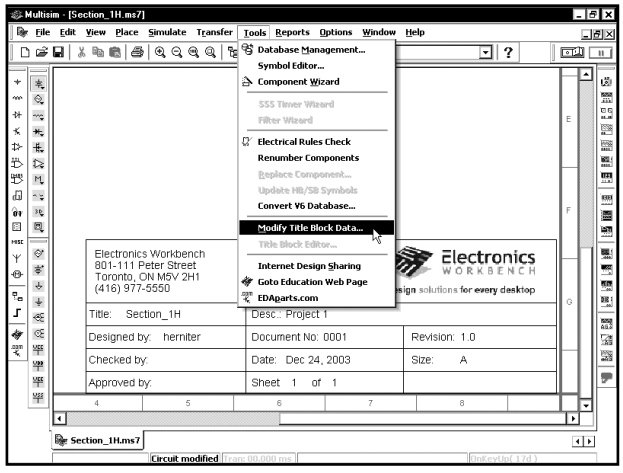
Выберем файл и нажмем кнопку **Open (Открыть)**. Был выбран файл ***default.tb 7***. При этом блок заголовка будет «привязан» к курсору мыши, и можно добавить его в схему, как и любой другой компонент. Поместим блок заголовка в нижний правый угол:

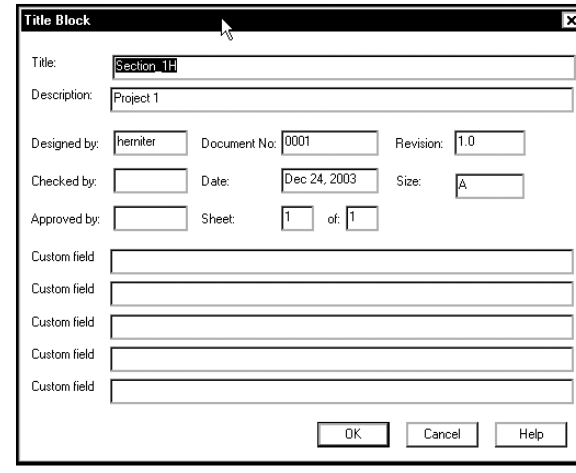


Поместим курсор мыши на блок заголовка и несколько раз нажмем клавишу **F8**, чтобы увеличить масштаб:

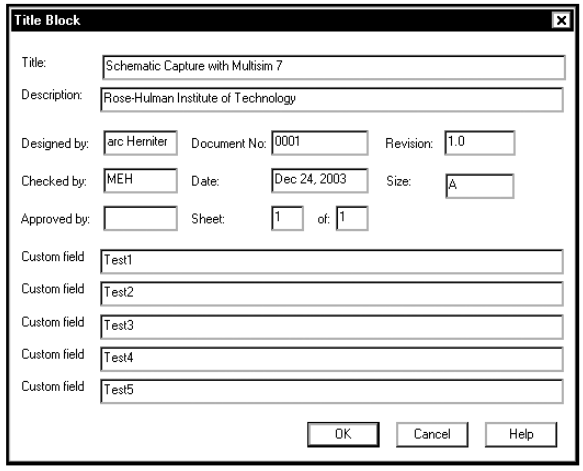


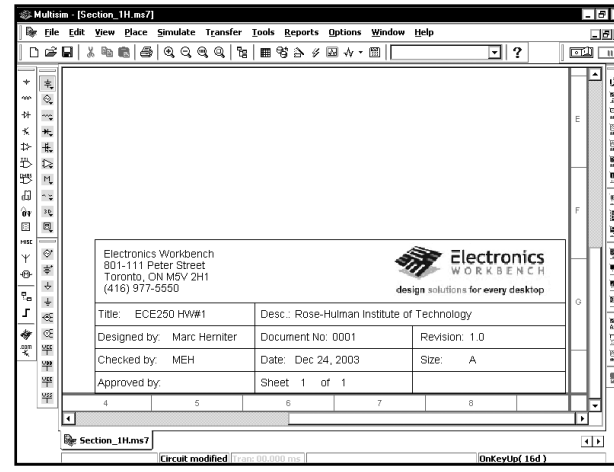
Чтобы изменить содержимое текстового блока, выберем в меню пункты **Tools ⇒ Modify Title Block Data (Инструменты ⇒ Изменить содержимое блока заголовка)**:





Введем в текстовые поля нужные данные и нажмем кнопку **OK**. Поскольку не вся информация в заголовке (штампе) понятна, внесем информацию на все поля, чтобы проверить ее размещение в блоке. Мы всегда сможем удалить данные:



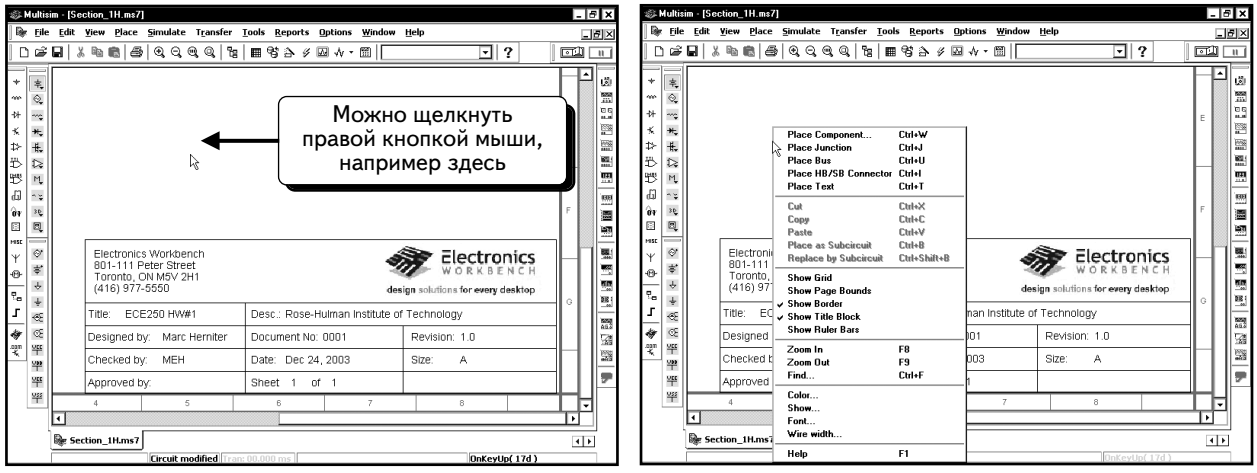


Содержимое блока заголовка показано ниже:

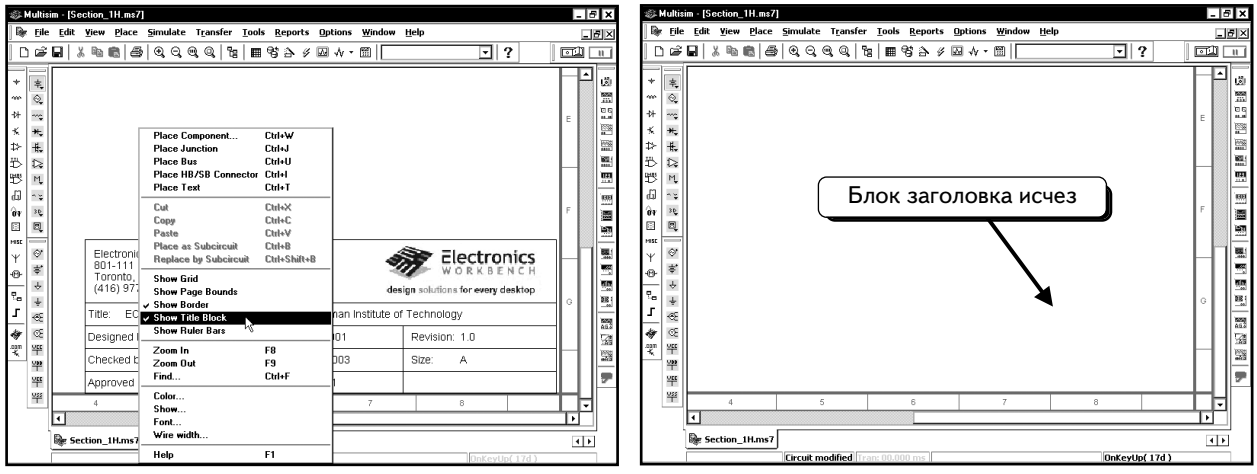
Electronics Workbench 801-111 Peter Street Toronto, ON M5V 2H1 (416) 977-5550	Electronics WORKBENCH design solutions for every desktop	
Title: ECE250 HW#1	Desc.: Rose-Hulman Institute of Technology	
Designed by: Marc Herniter	Document No: 0001	Revision: 1.0
Checked by: MEH	Date: Dec 24, 2003	Size: A
Approved by:	Sheet 1 of 1	

Как видим, информация на пяти полях не используется в данном блоке заголовка. Эти данные предназначены для документации, а не для блока заголовка.

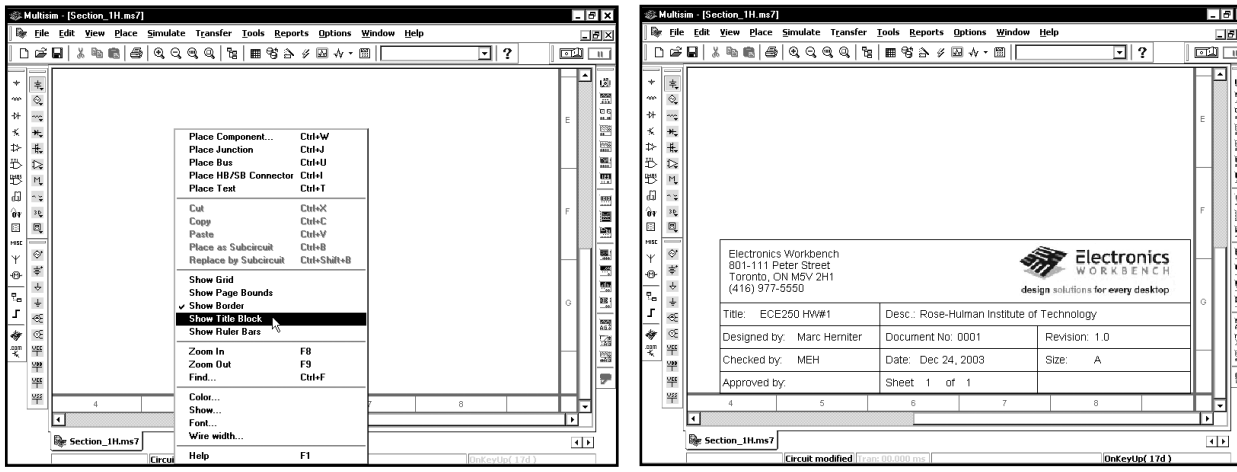
Мы научились добавлять в схему блоки заголовков и редактировать их. При необходимости всегда можно удалить блок заголовка. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на схеме, чтобы отобразить ниспадающее меню:



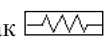
Выберем в меню пункт **Show Title Block (Отобразить блок заголовка)**. Так как блок заголовка был отображен, данная опция скроет его:



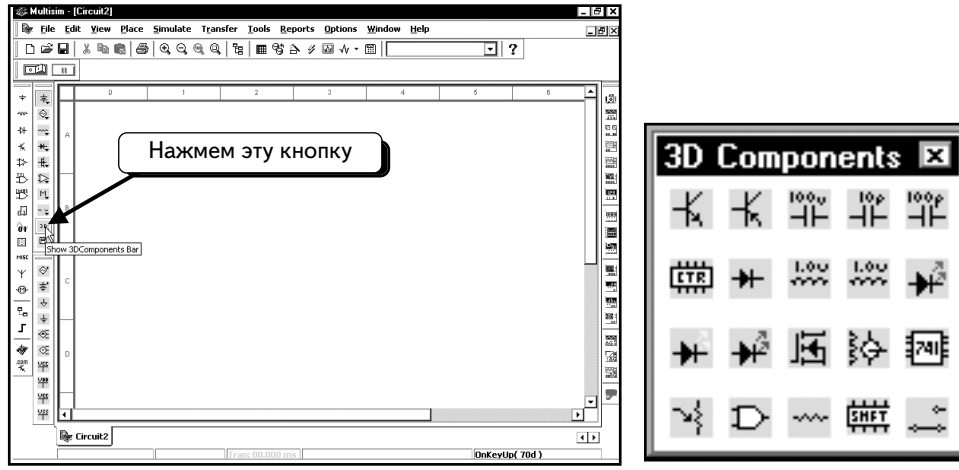
И блок заголовка, и его данные остались в схеме (они просто скрыты). Чтобы отобразить блок заголовка, достаточно только повторить действия, описанные выше:



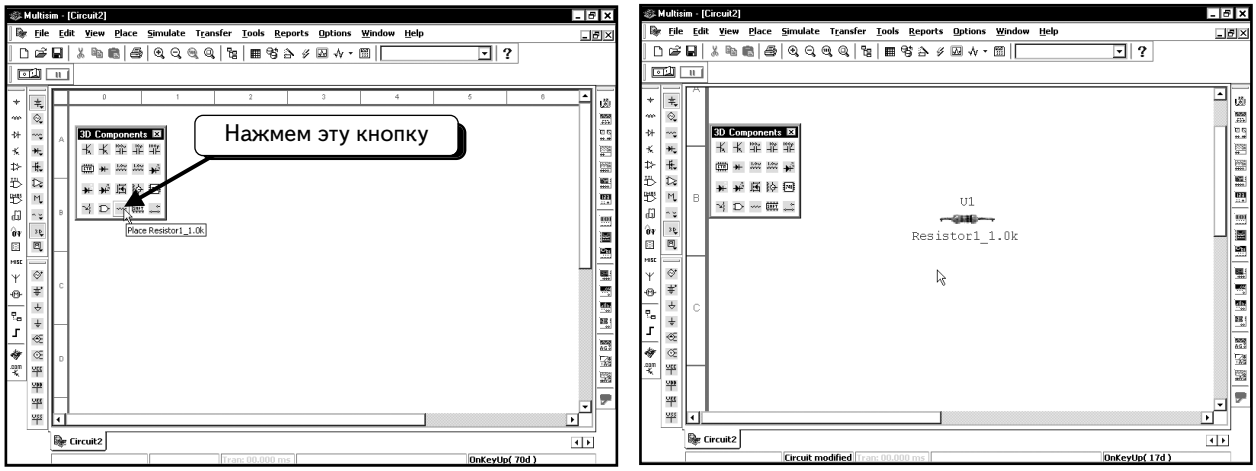
1.9. Трехмерные компоненты

В программе Multisim 7 появилась новая функция — возможность добавления трехмерных изображений, таких как  и , вместо таких условных обозначений, как  или . Эти изображения показывают студентам, как будет выглядеть реальное устройство, выполненное по данной схеме, и помогают осознать связь абстрактного моделирования с работой реальных приборов. В этом разделе будет продемонстрирован пример использования трехмерных компонентов. Большинство примеров моделирования в данной книге выполнены с применением стандартных условных обозначений. При необходимости можно заменить их аналогичными трехмерными компонентами.

Откроем окно для создания схемы. Чтобы добавить трехмерный компонент, следует открыть панель **3D Components (Трехмерные компоненты)**. Нажмем кнопку **Show 3D Components Bar (Показать панель 3D Components)**, — как показано ниже :

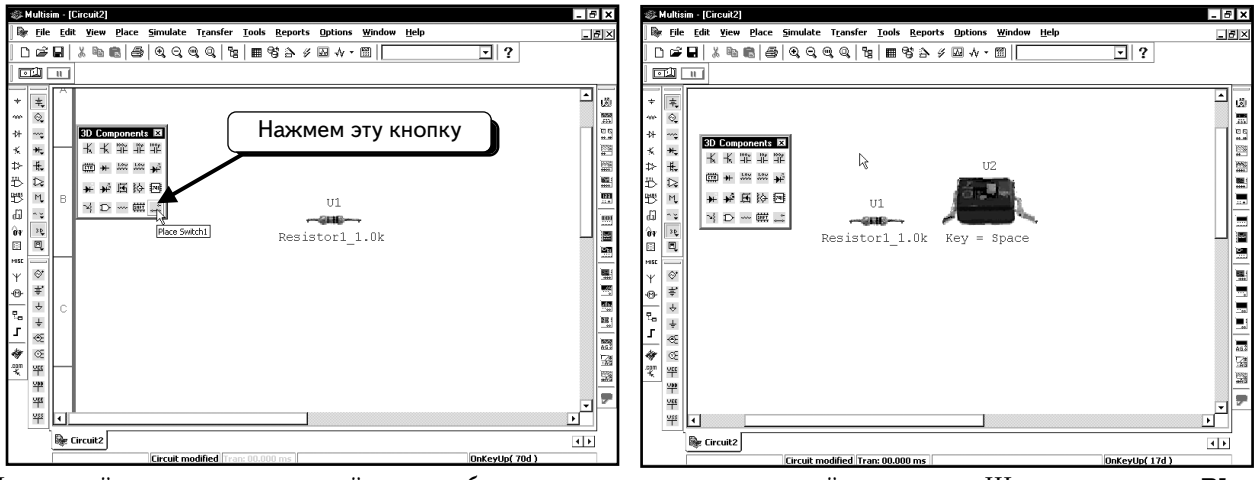


На этой панели находится большинство доступных трехмерных компонентов. Имеются и другие трехмерные компоненты, но их немного. Добавим в схему резистор 1,0 кОм. Нажмем кнопку **Place Resistor 1_1.0k (Добавить резистор 1.0 кОм)** . Резистор будет «привязан» к курсору мыши. Поместим резистор в схему так, как описано ранее:

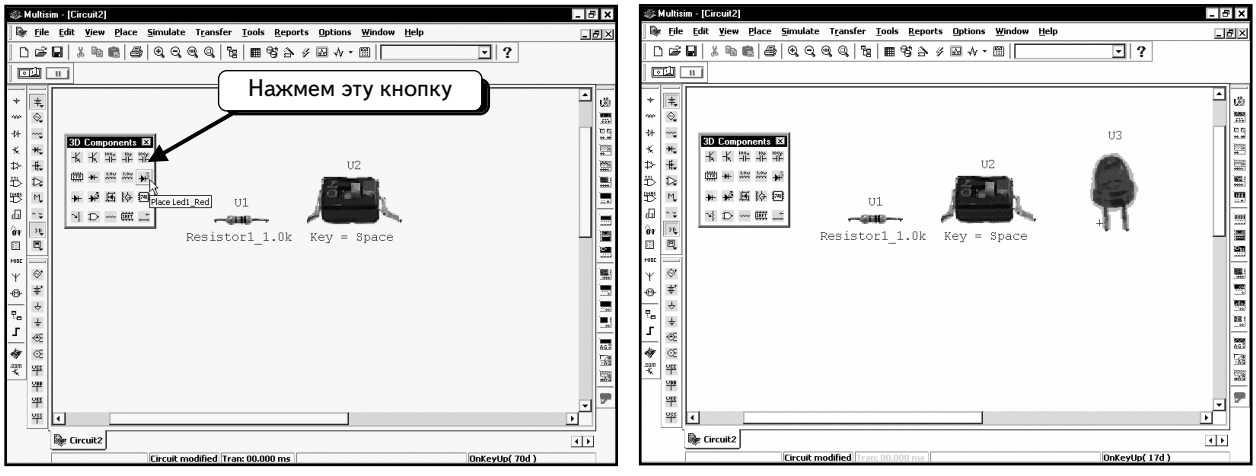


Отметим две отличительные особенности такого компонента. Во-первых, он выглядит точно так же, как реальный резистор (даже имеет такой же цвет). Во-вторых, мы не можем изменить значение для резистора (так же, как и в реальном устройстве).

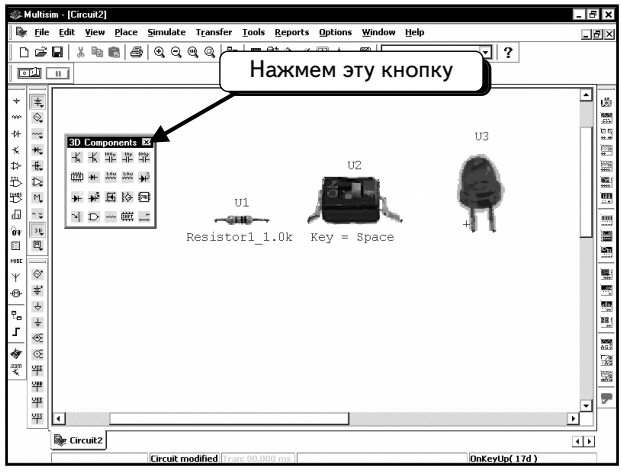
Добавим переключатель. Щелкнем кнопку **Place Switch1 (Добавить переключатель 1)** . Компонент будет «привязан» к курсору мыши. Добавим переключатель в схему рядом с резистором:

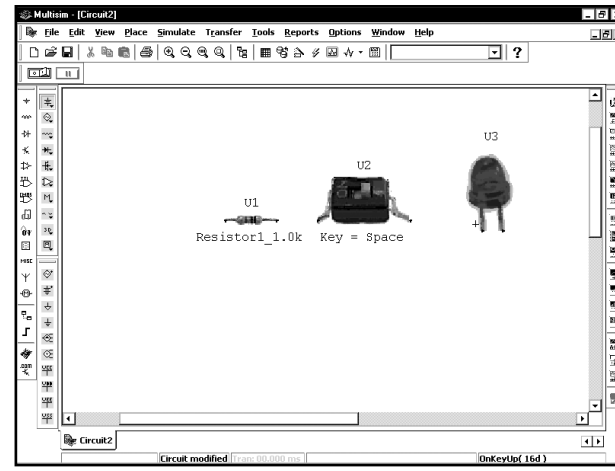


Последний компонент, который надо добавить в схему, — это красный светодиод. Щелкнем кнопку **Place Led1_Red** **(Добавить красный светодиод 1)** и поместим компонент в схему.

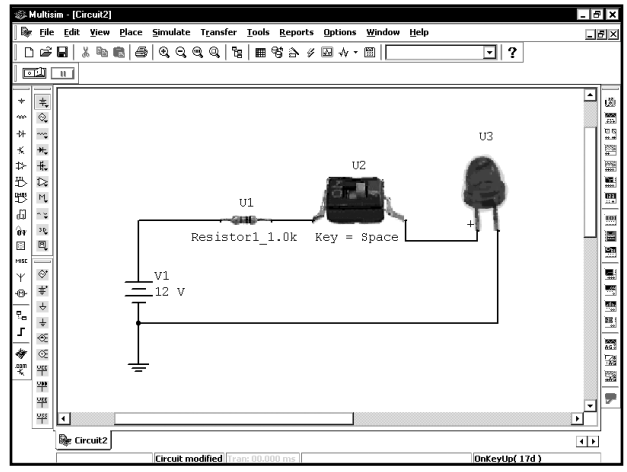


Мы завершили работу с панелью инструментов **3D Components**; закроем ее, щелкнув по символу ☒ в строке заголовка:



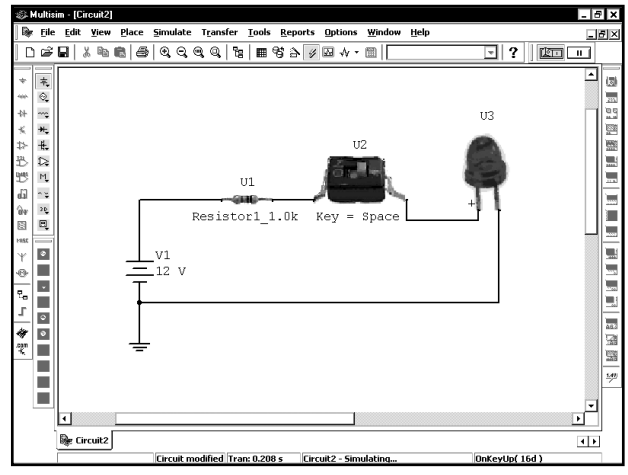


Далее добавим в схему источник постоянного напряжения DC и подключим компоненты так, как показано ниже:

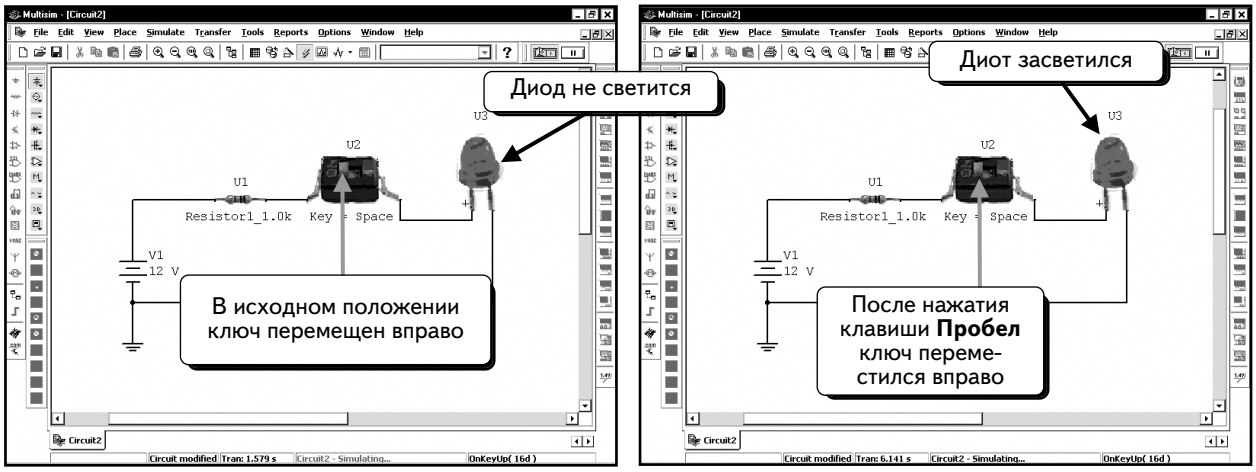


Трехмерные компоненты подключаются так же, как и стандартные.

Мы готовы к выполнению моделирования. Несмотря на то, что подробно о моделировании будет рассказано в других главах, покажем процесс моделирования для данного случая. Нажмем клавишу **F5**:

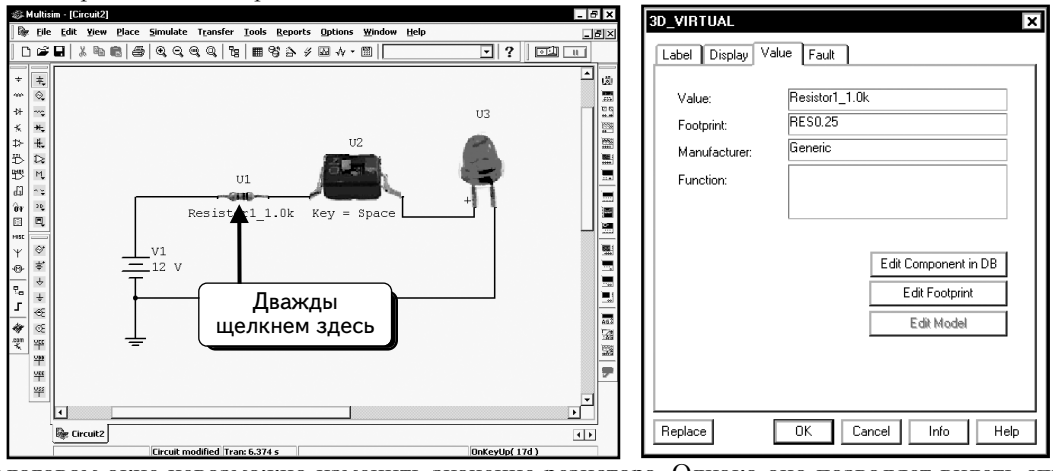


Ничего не произошло! Это потому, что переключатель выключен и в схеме нет тока. Чтобы включить переключатель, нажмем клавишу **ПРОБЕЛ**. Пойдет ток, и светодиод загорится, как показано ниже:

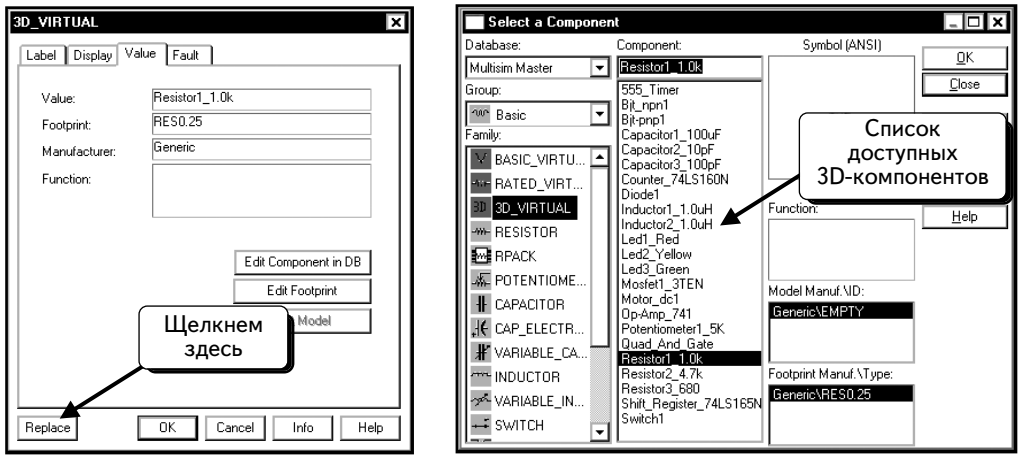


Если несколько раз нажать клавишу **ПРОБЕЛ**, то будет видно, что светодиод загорается и гаснет. Здесь мы не будем углубляться в детали. Вы сможете использовать полученные навыки в других упражнениях. Чтобы остановить процесс моделирования, повторно нажмем клавишу **F5**.

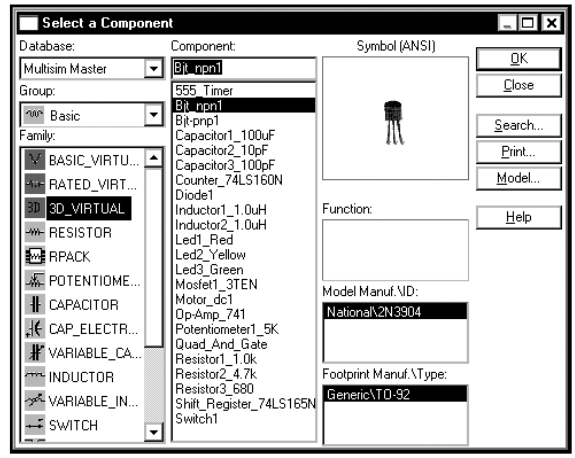
Нам необходимо рассмотреть еще одну опцию. Дважды щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по иконке резистора, чтобы редактировать его настройки:



В этом диалоговом окне невозможно изменить значение резистора. Однако оно позволяет видеть список всех доступных трехмерных компонентов. Нажмем кнопку **Replace (Заменить)**:



Нам доступно небольшое количество компонентов. Для резисторов можно выбирать значения 1,0, 4,7 и 680 Ом. Если выбрать компонент, то отобразится его описание. Например, компонент **Bjt_npn1** представляет собой транзистор 2N3904 фирмы National Semiconductor:



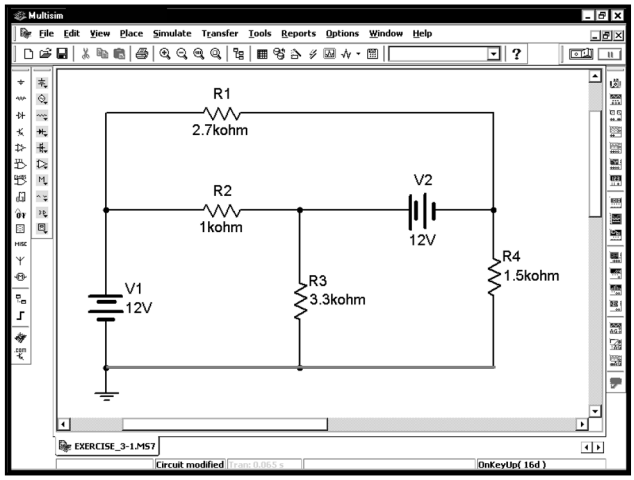
Мы будем использовать этот компонент во многих дальнейших примерах, поэтому можно выбрать для них трехмерный символ и работать с ним, если он вас больше устраивает.

Мы уже освоили данное диалоговое окно во время добавления компонентов. Оно было показано для того, чтобы был виден список доступных компонентов. Просмотрев этот список, нажмем кнопку **Close (Закрыть)**, чтобы вернуться к схеме.

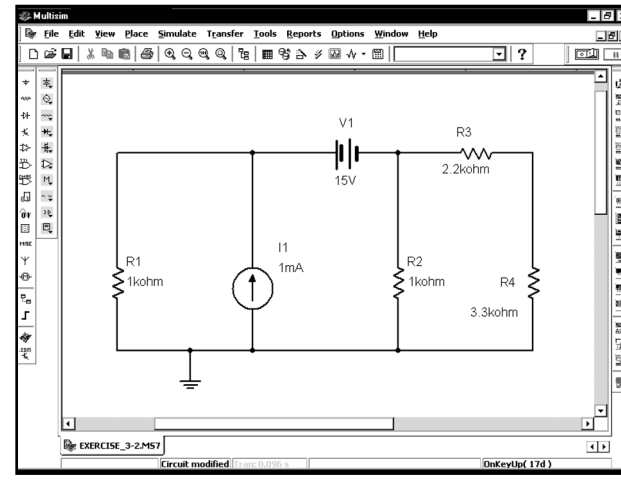
1.10. Задачи

При решении задач, описанных ниже, вам следует самостоятельно создать схемы, приведенные на соответствующих рисунках. Используйте ту же нумерацию компонентов и введите те же названия для узлов. Добавьте блок заголовка с вашим именем, классом, а также описанием задач. Большинство схем содержит компоненты, с которыми мы пока еще не работали.

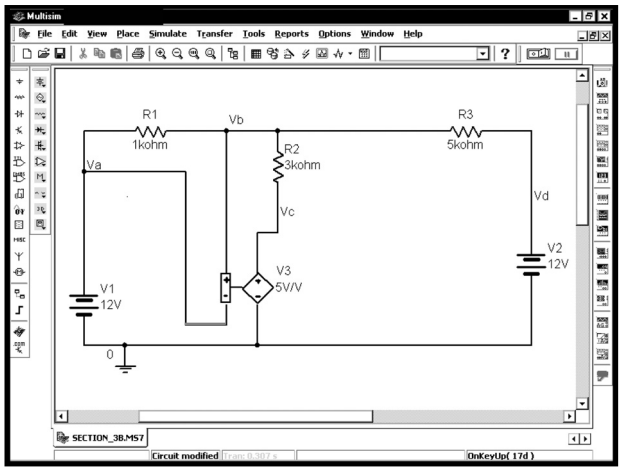
Задача 1.1



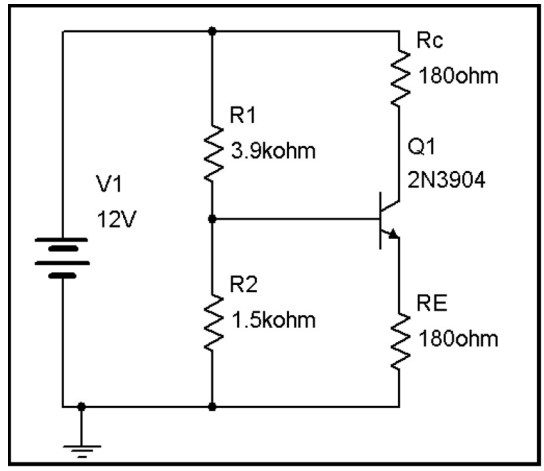
Задача 1.2



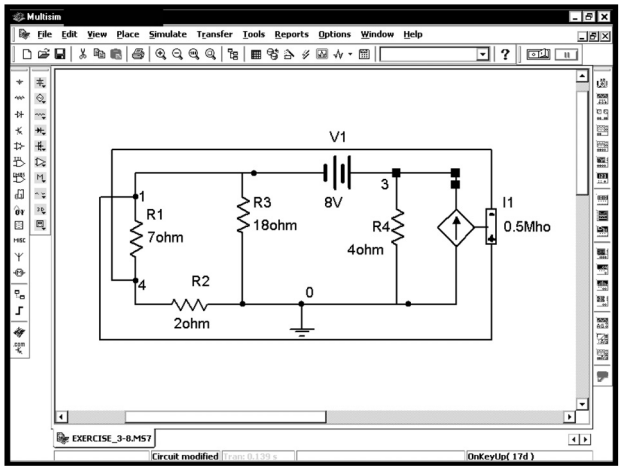
Задача 1.3



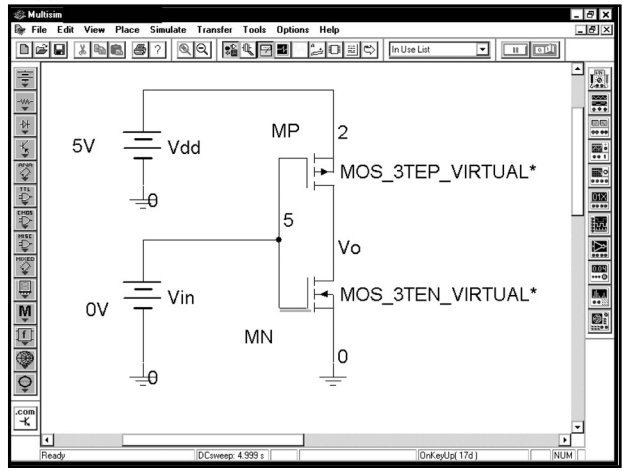
Задача 1.6



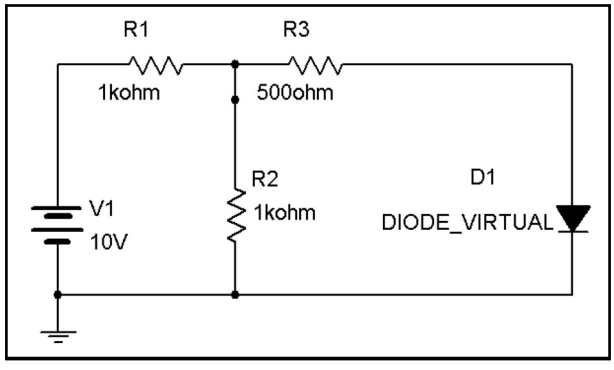
Задача 1.4



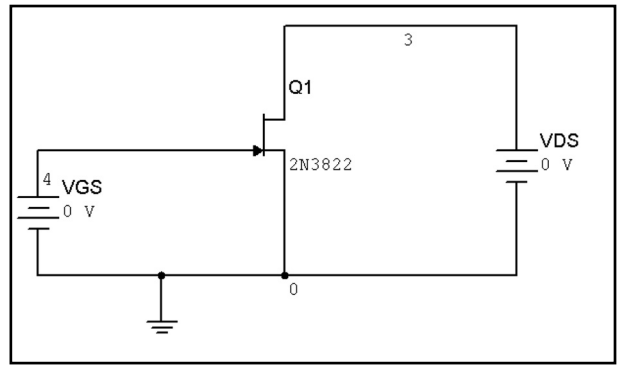
Задача 1.7



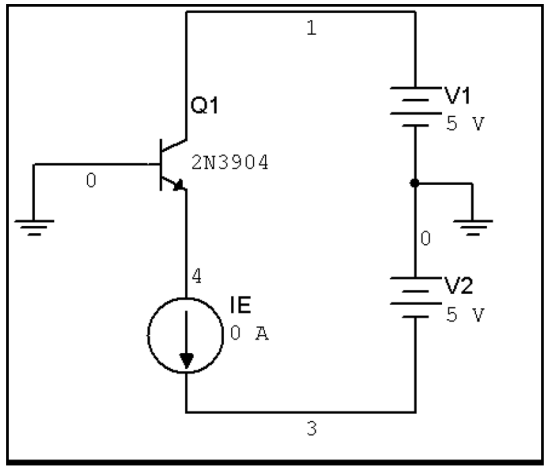
Задача 1.5



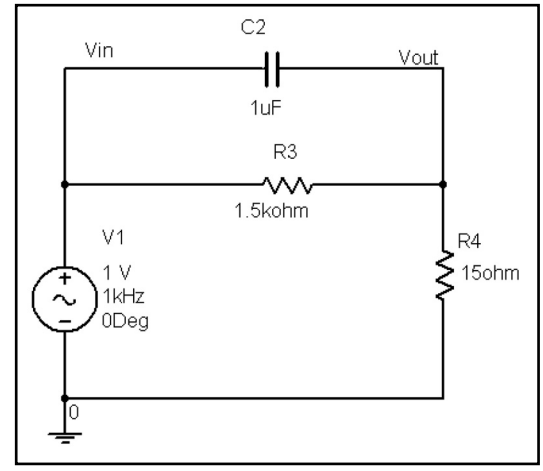
Задача 1.8



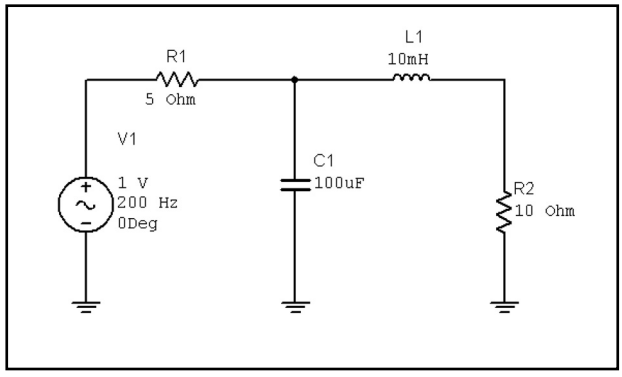
Задача 1.9



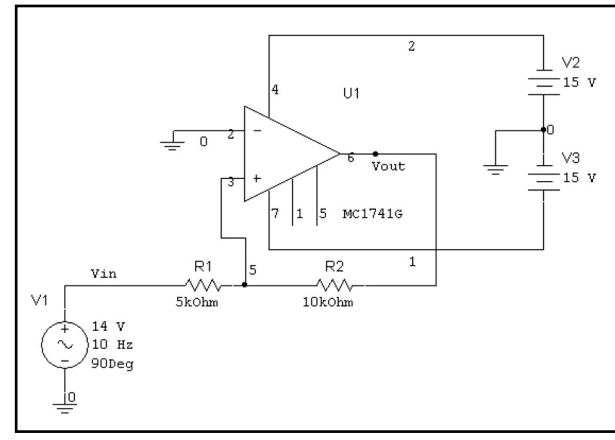
Задача 1.11



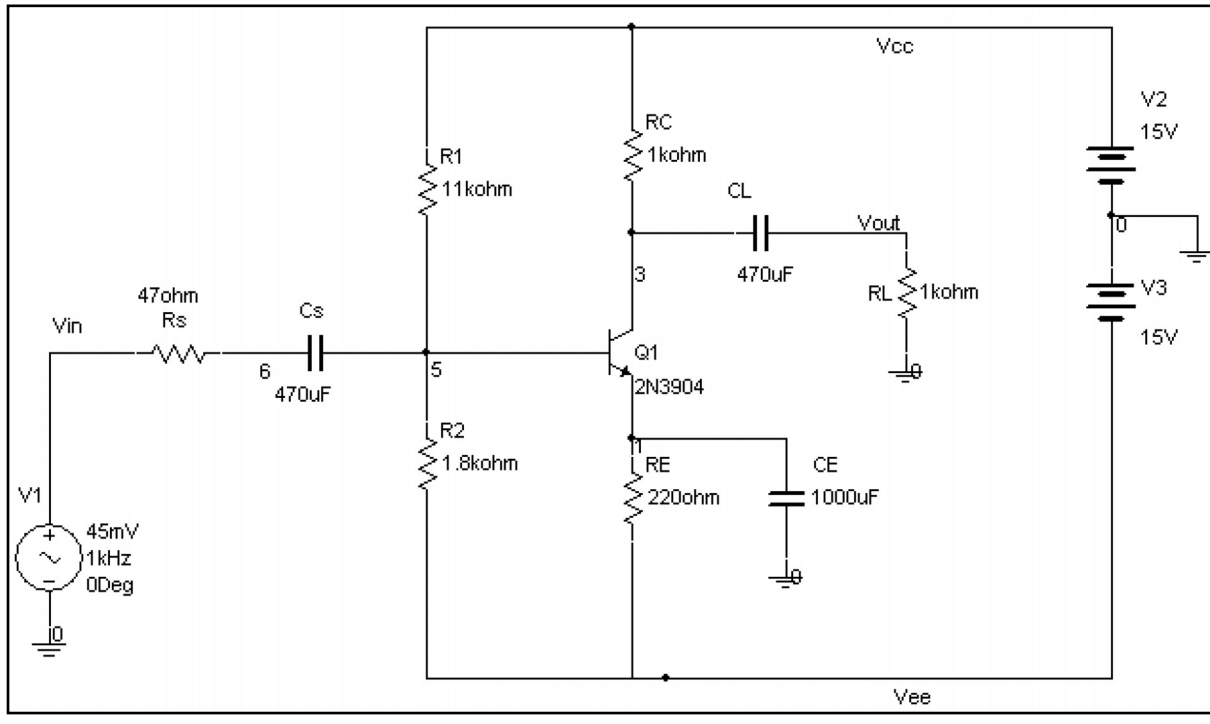
Задача 1.10



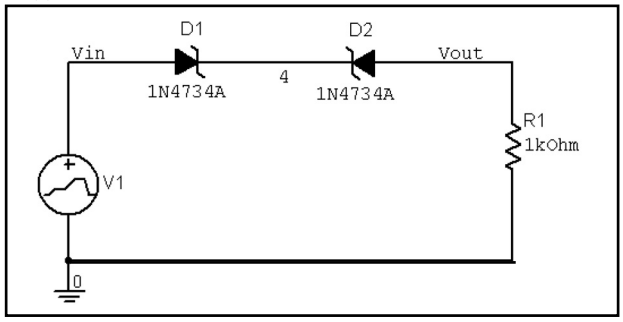
Задача 1.12



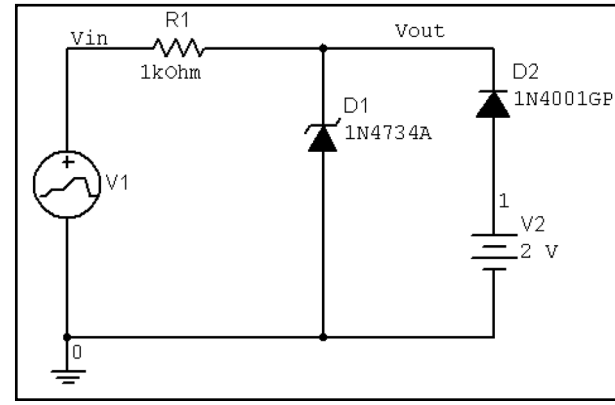
Задача 1.13



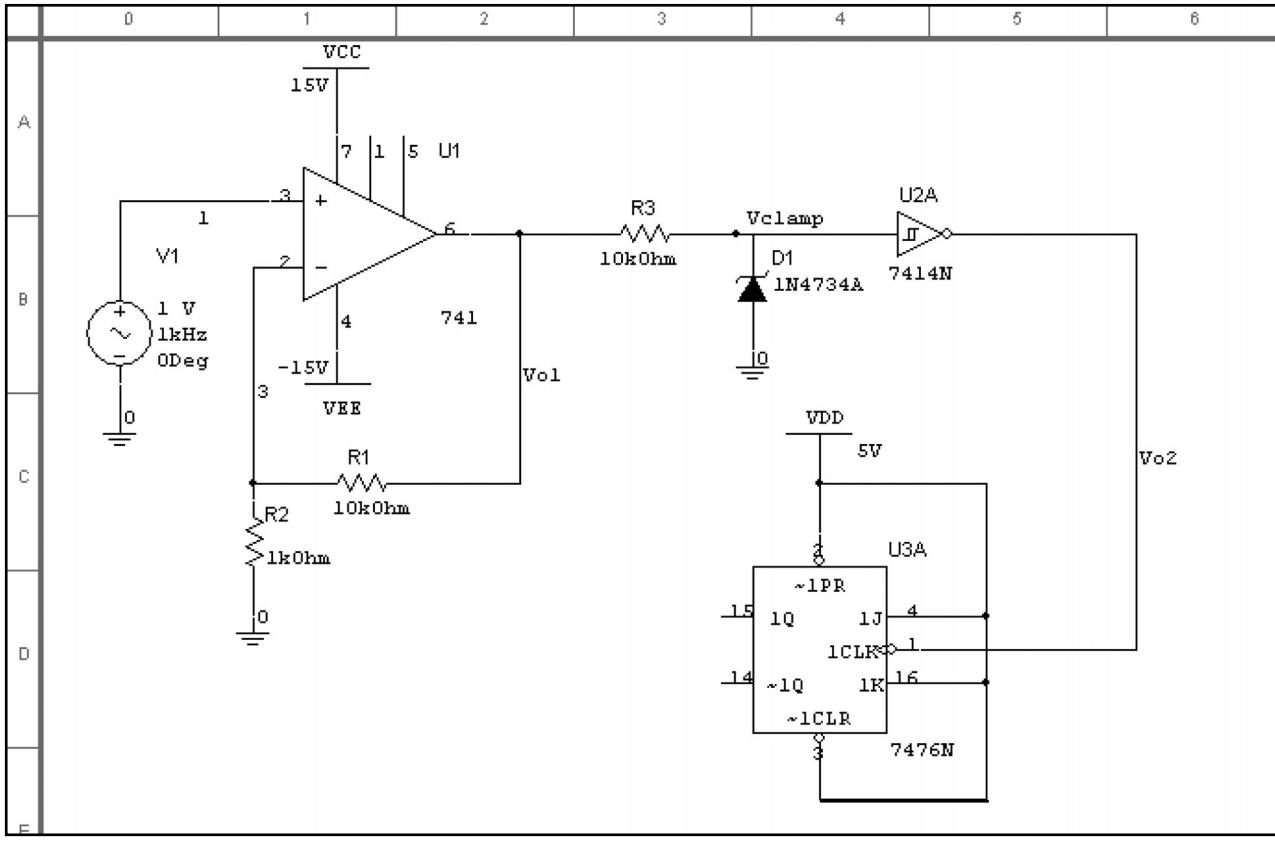
Задача 1.14



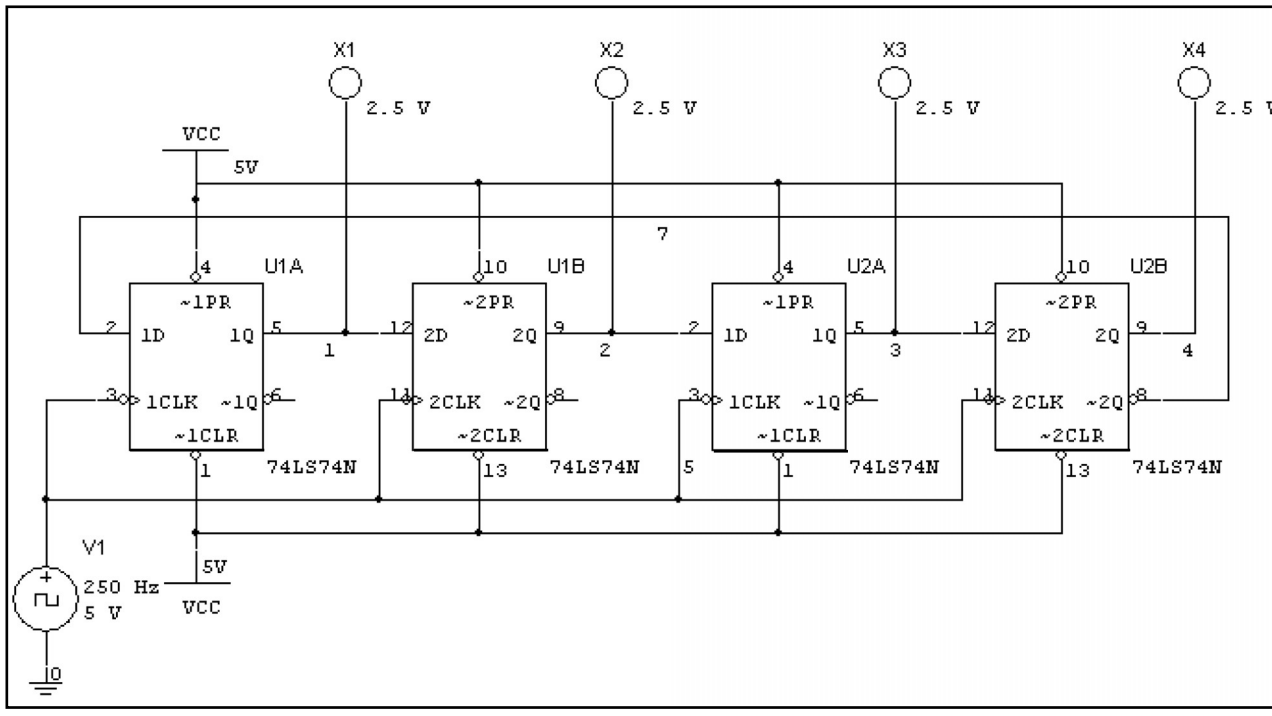
Задача 1.15



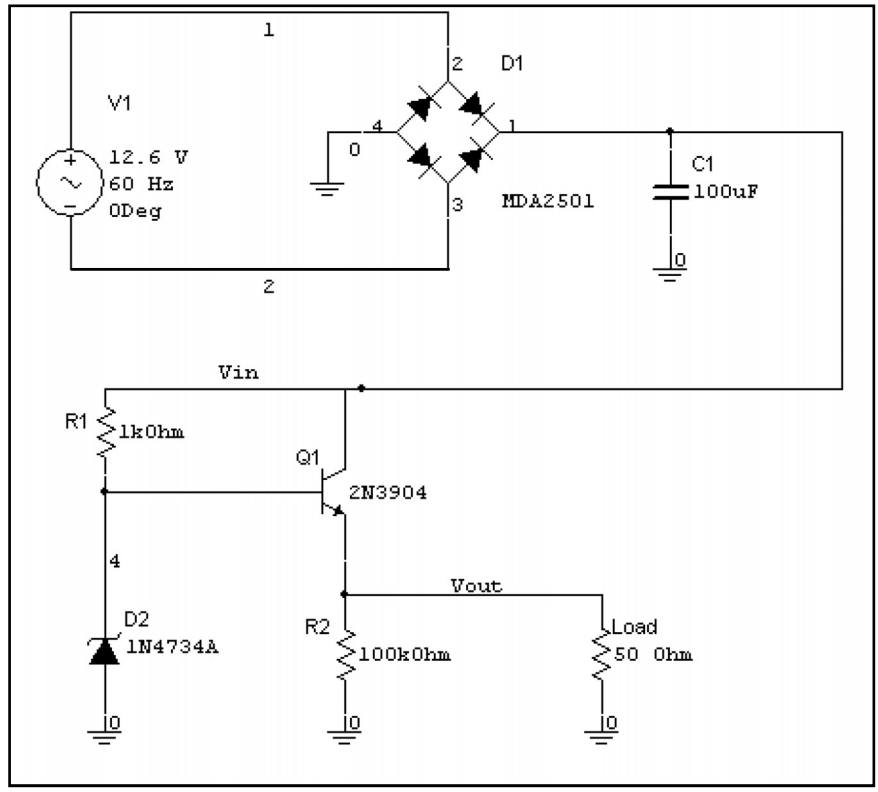
Задача 1.16



Задача 1.17



Задача 1.18



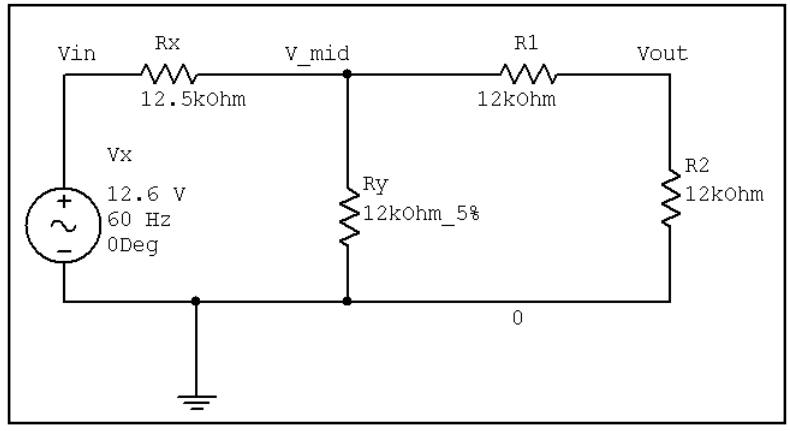
ГЛАВА 2

Функции Postprocessor и Grapher

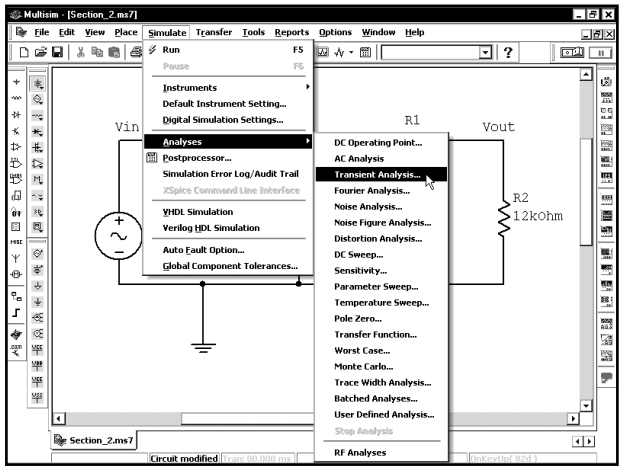
Postprocessor и Grapher — это программы пакета Multisim, которые позволяют отобразить результаты моделирования в графическом виде. В нашей книге данные программы будут постоянно использоваться для демонстрации результатов моделирования. Отдельные аспекты программ Postprocessor и Grapher описываются в разных разделах книги. Если вы выберите какие-то отдельные примеры, то, вероятно, не сможете научиться применять все инструменты в программах Postprocessor и Grapher. В результате может случиться так, что в разделе книги, который вы будете читать, встретится ссылка на инструмент, описанный в том разделе, который был пропущен вами при чтении. Чтобы избежать этого, здесь будет рассказано о большинстве инструментов, используемых в Postprocessor и Grapher.

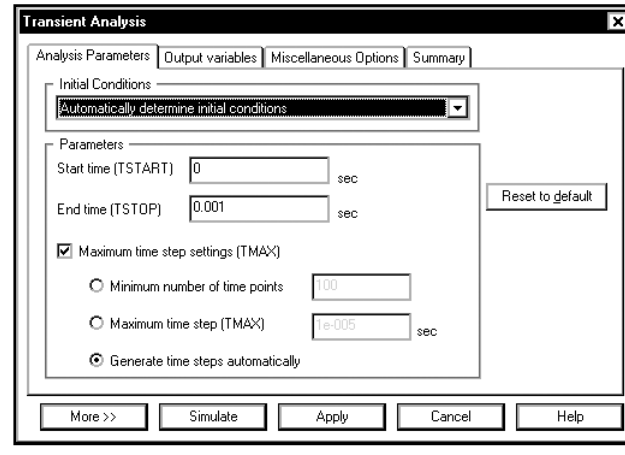
Данная глава основана на графиках, которые мы будем создавать в разделах 2.1—2.3. Рекомендуется прочесть всю главу подряд, так как в разделах, следующих после раздела 2.3, используются графики, построенные ранее. Если у вас нет такой возможности, последовательно прочтите разделы 2.1—2.3, а потом переходите к разделу 2.4. В нем будет показано, как сохранять и загружать созданные вами графики. Владея этими навыками, вы сможете быстро восстановить результаты вашей работы и перейти к последующим разделам.

Чтобы показать возможности функций Postprocessor и Grapher, создадим модель схемы из главы 1 с использованием анализа переходных процессов:

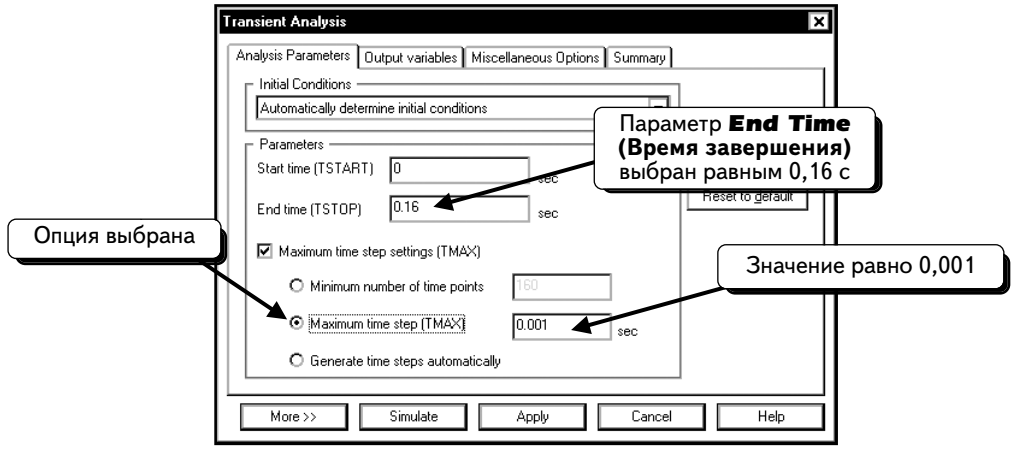


Отметим, что узлы в **Vin, V_mid** и **Vout** были переименованы и их названия были отображены на схеме. Для работы с функцией Postprocessor необходимо знать названия узлов. Как вводить названия узлов и отображать их на схеме, можно посмотреть в разделе 1.7. Предполагается, что вы прочитали главу 1 и можете приступить к анализу переходных процессов. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analysis** ⇒ **Transient Analysis** (Моделировать ⇒ **Анализ** ⇒ **Анализ переходных процессов**):



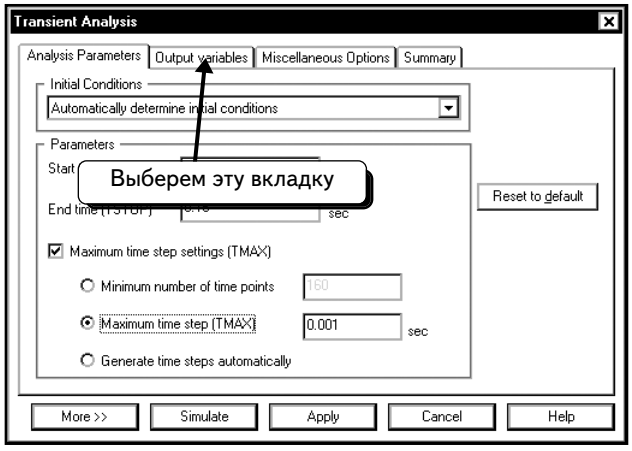


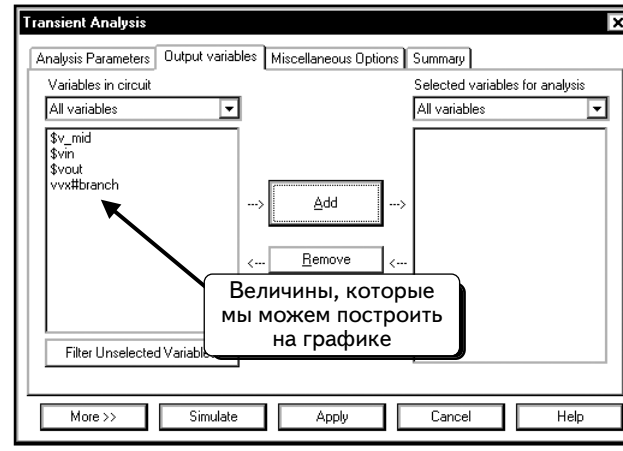
Изменим параметры, показанные ниже:



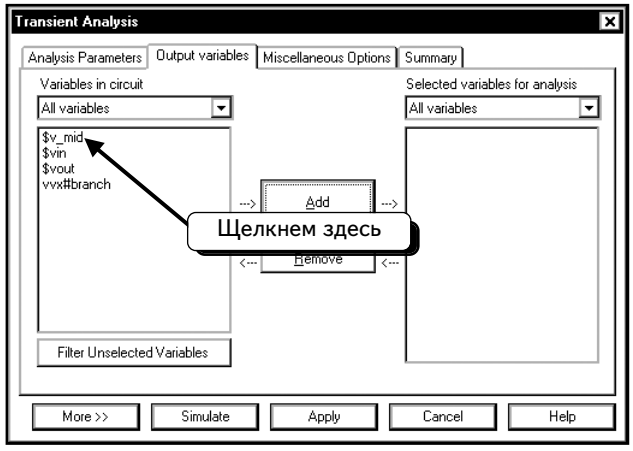
Эти опции подробно описаны в главе 6. Поэтому здесь мы не будем говорить о них.

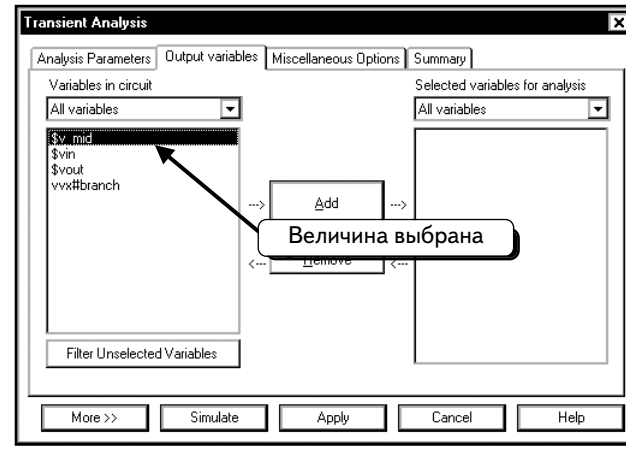
При запуске моделирования в SPICE (при выполнении анализа переходных процессов, AC Sweep, DC Sweep или любого другого анализа) следует указать параметры **Output variables (Выходные переменные)**. Только эти переменные могут отображаться на графиках функций Postprocessor и Grapher. Например, если схема содержит 100 элементов, только переменные, которые были настроены как выходные, будут доступны для функций Postprocessor и Grapher. Щелкнем по вкладке **Output variables**:



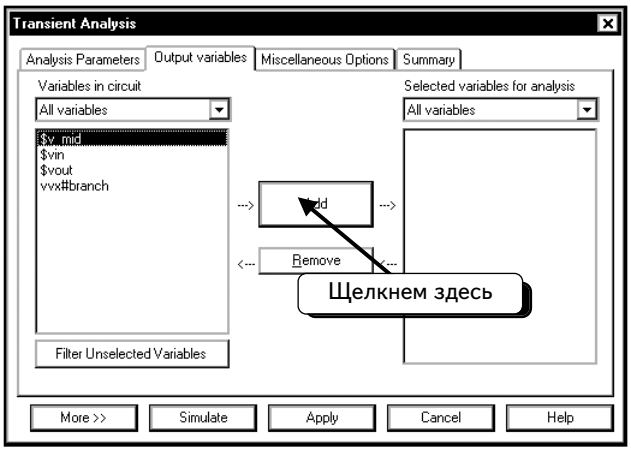


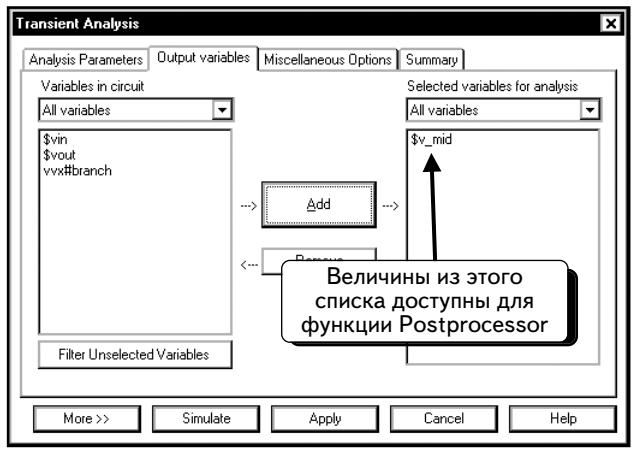
Как видим, на вкладке имеются три напряжения на узлах (**$v_mid, $vin и $vout**) и ток, проходящий через источник напряжения **Vx (vvx#branch)**. При стандартном моделировании выбираются только необходимые компоненты. В данном примере выберем все переменные из списка. Можно добавлять переменные по отдельности или одновременно. Чтобы добавить одну переменную, щелкнем по ней ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, например по переменной **v_mid**:





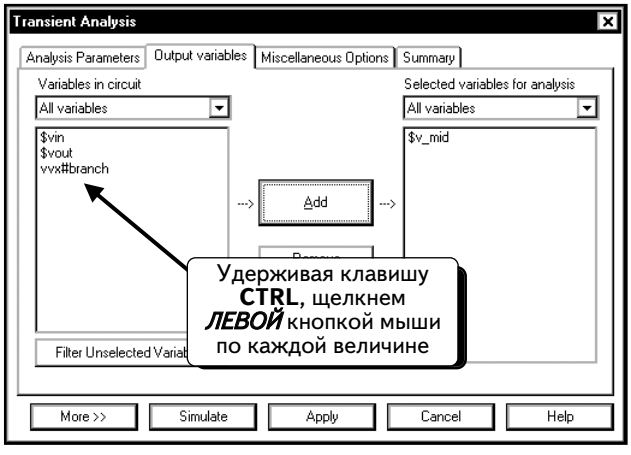
Нажмем кнопку **Add (Добавить)**, чтобы открыть программе Postprocessor доступ к настройкам напряжений на узлах:

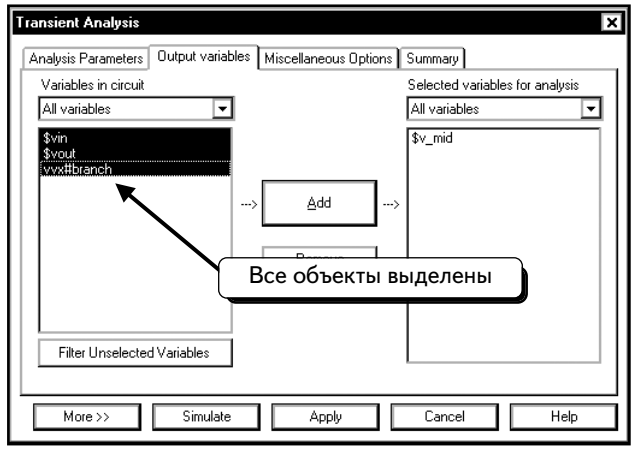




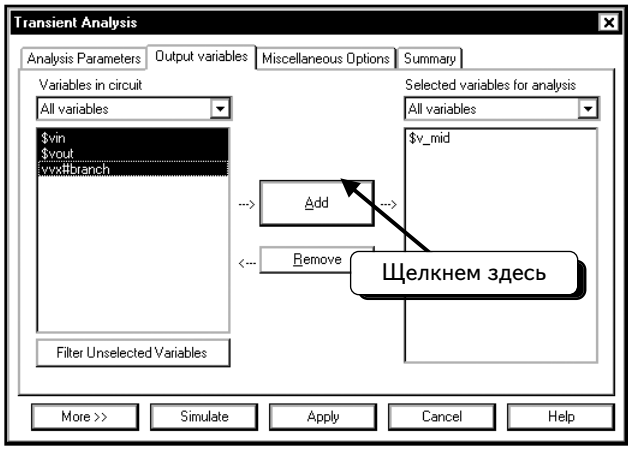
Переменные на правой панели доступны для функции Postprocessor и могут быть отложены на графике после завершения моделирования.

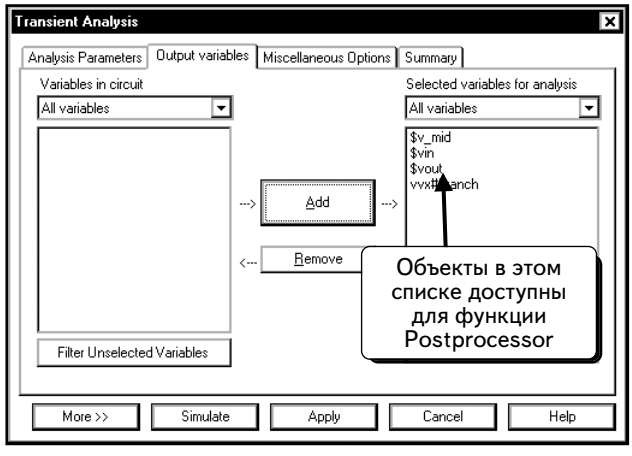
Чтобы открыть доступ ко всем настройкам по напряжению и току, необходимо выбрать все объекты на левой панели. Чтобы выбрать группу переменных, щелкнем по каждой из них, удерживая нажатой клавишу **CTRL**:



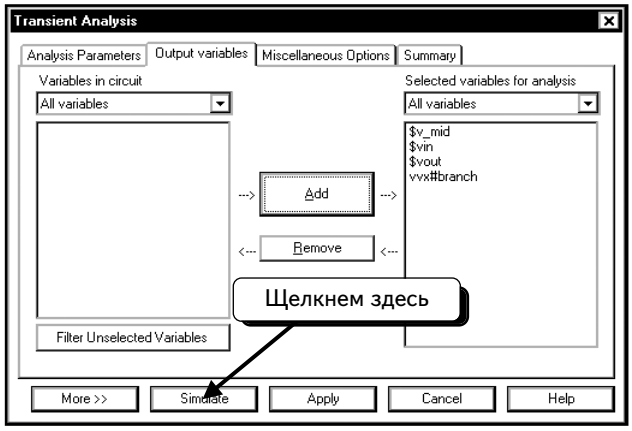


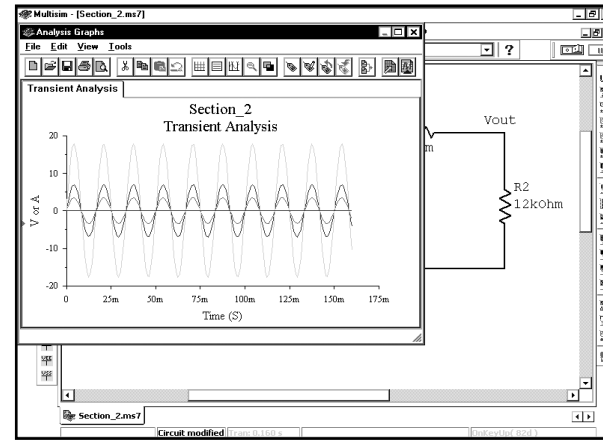
Нажмем кнопку **Add**, чтобы сделать данные доступными:





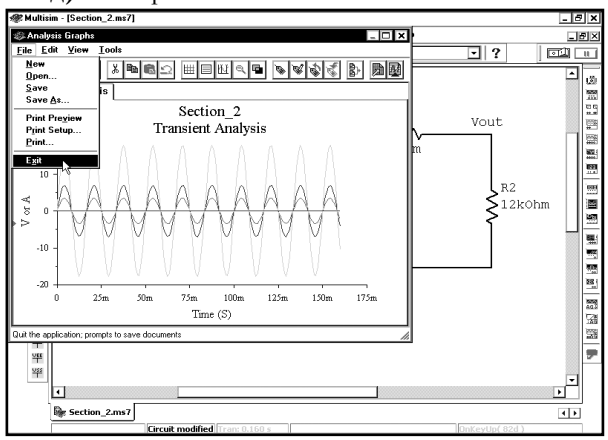
Теперь, когда всё готово к моделированию, нажмем кнопку **Simulate (Моделировать)**. После запуска и окончания моделирования откроется окно Grapher, в котором отобразятся все переменные **Output variables** на одном графике:

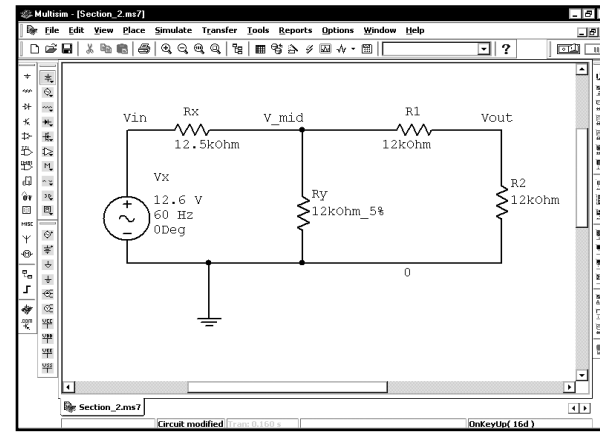




После каждого моделирования создается график с выходными переменными. Он может оказаться полезным или нет (это зависит от выбранных переменных). При запуске моделирования всегда открывается новая страница Grapher. При работе с небольшими схемами, возможно, потребуется графически отобразить только одну или две переменные. Тогда с помощью этой функции можно быстро создать график с нужными переменными. Если моделируется большая схема с множеством компонентов, график будет не слишком полезен, так как на нем отображаются все переменные одновременно. В нашем графике кривая тока совершенно бесполезна, потому что она настолько мала по сравнению с кривыми напряжения, что выглядит как прямая линия (а в действительности это не так). С помощью функции Postprocessor построим новый график.

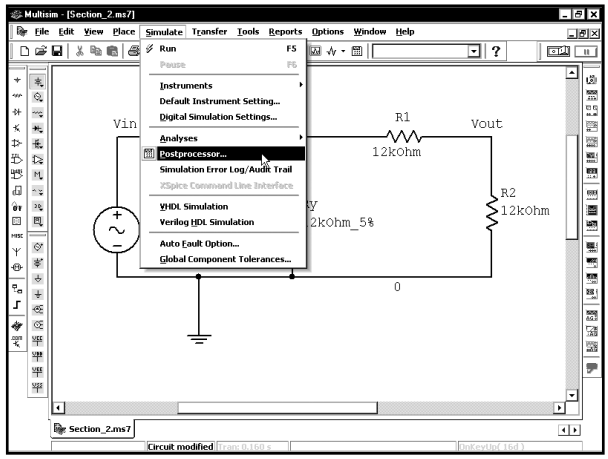
При следующем моделировании следует закрыть окно Grapher и выбрать в меню пункты **File ⇒ Exit (Файл ⇒ Выход)**. На экране останется окно схемы:

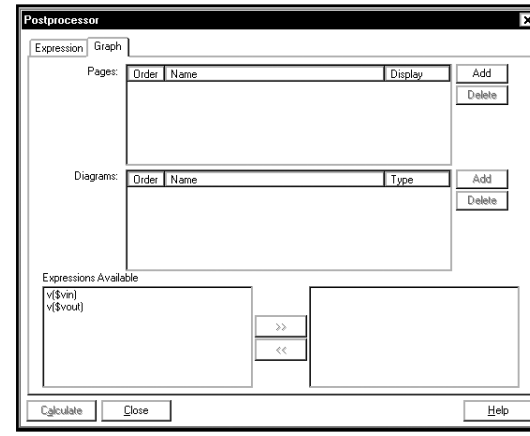




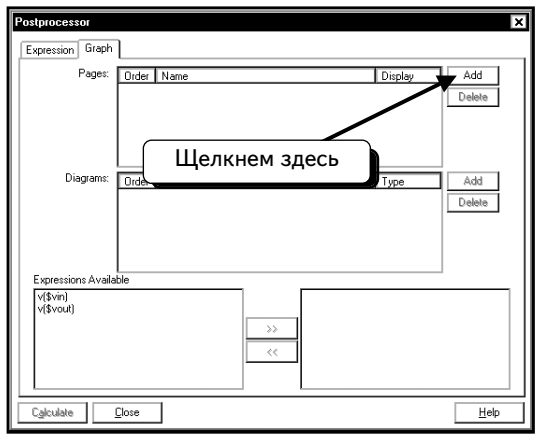
2.1. Создание одного графика

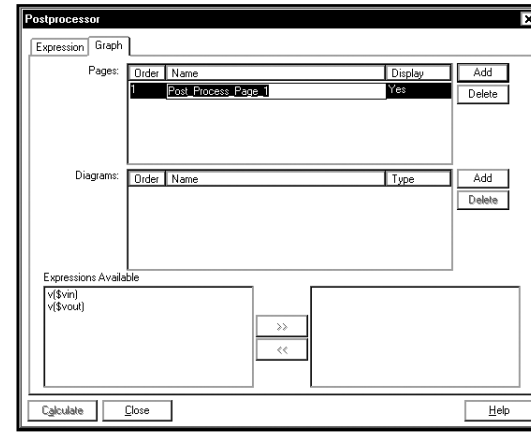
Теперь создадим график входного напряжения. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Postprocessor**, чтобы открыть программу Postprocessor:



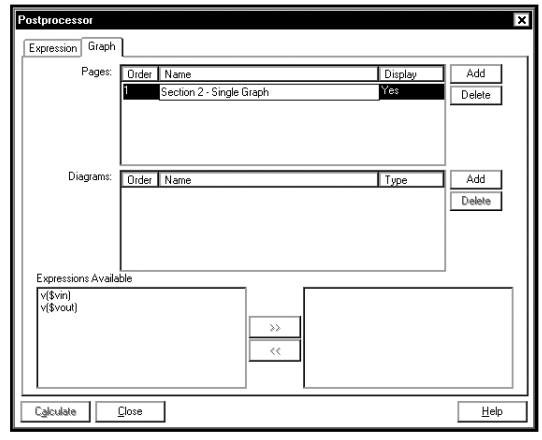


Нужно создать новую страницу в окне Grapher. Нажмем кнопку **Add**:

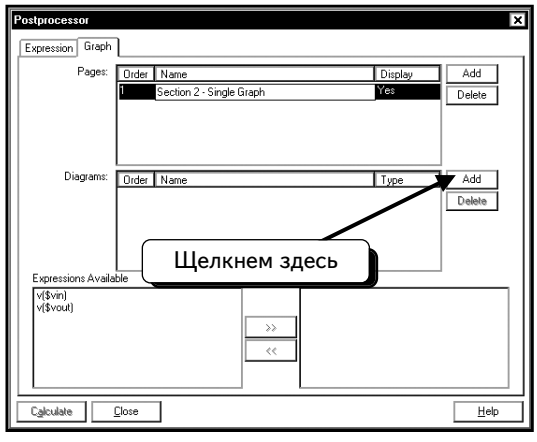


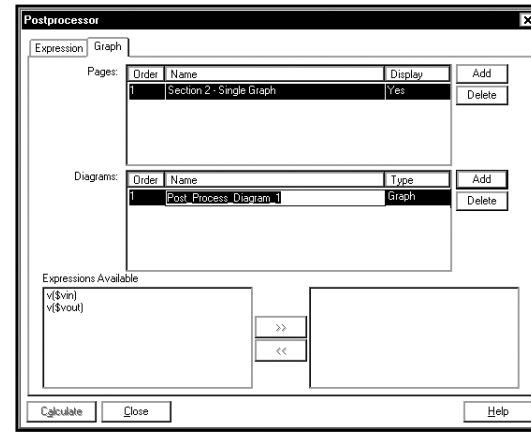


По умолчанию для страницы используется название **Post_Process_Page_1**. Заменим это название более информативным. Так как текст выделен, то можно просто ввести новое название (например **Section 2 – Single Graph**):

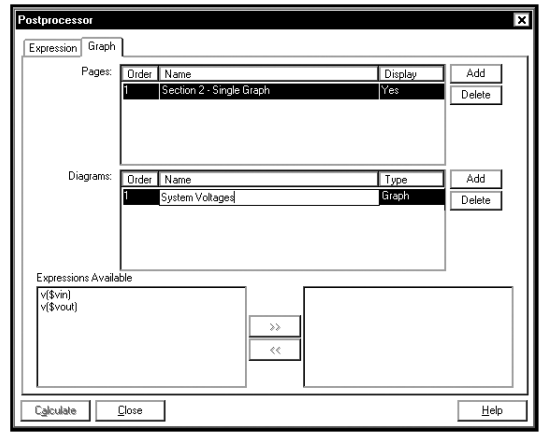


Далее необходимо создать график на странице. Нажмем кнопку **Add**:

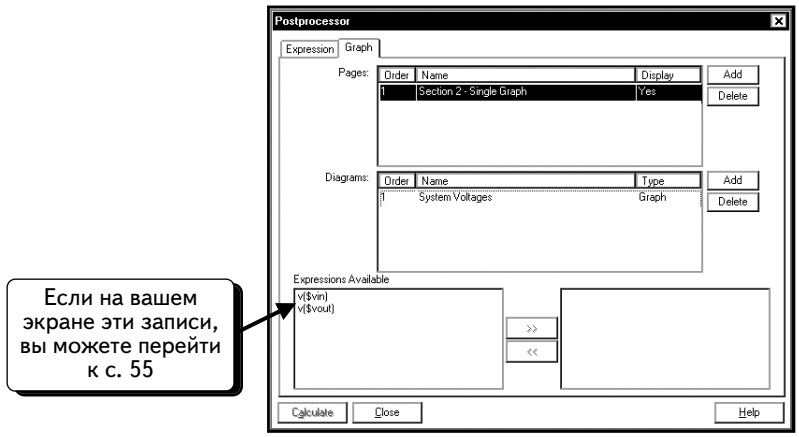




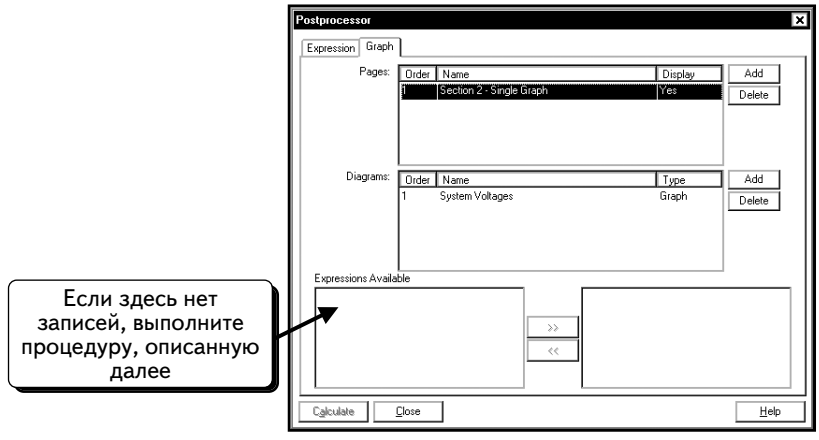
Программа предложит для графика новое название, которое является и заголовком. Чтобы отложить на графике кривые напряжения, введем название **System Voltages**. После выделения текста достаточно ввести новое название:



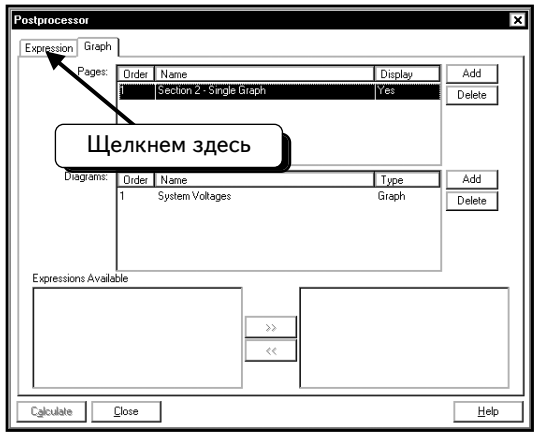
Всё готово к добавлению в график кривой. Сначала отложим на графике входное напряжение. Если увидите записи для получения графиков входного и выходного напряжений, как на экране ниже, то можно пропустить этот раздел и перейти к с. 55:

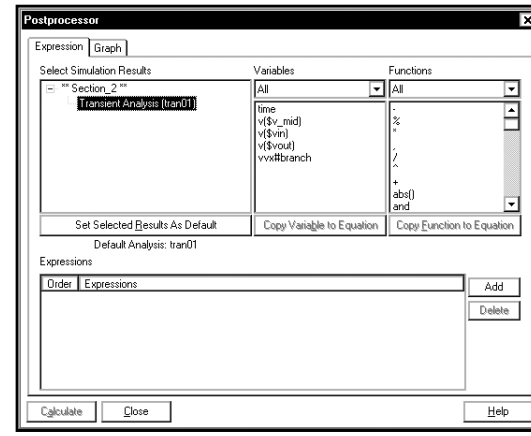


Если в списке нет нижеперечисленных выражений, то необходимо выполнить ряд следующих операций:

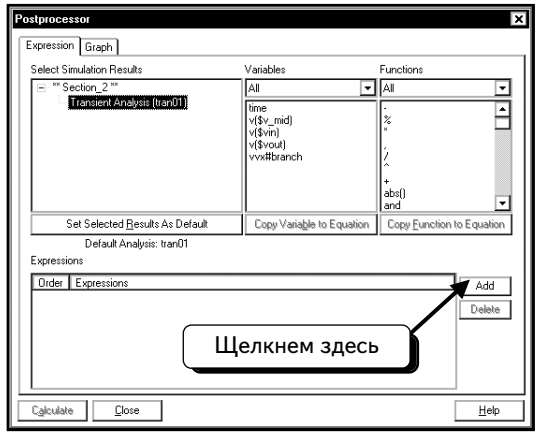


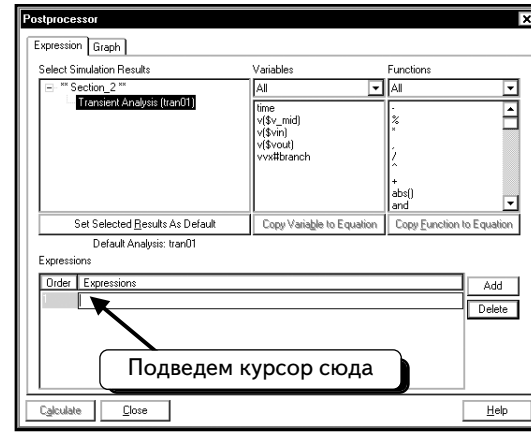
Необходимо добавить выражения (expressions) для входного и выходного напряжений. Щелкнем по вкладке **Expression (Выражение)**:



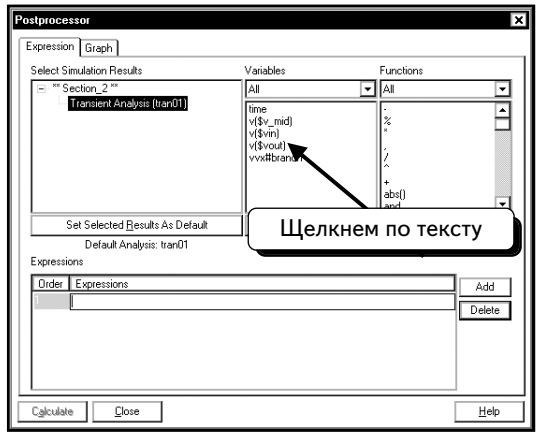


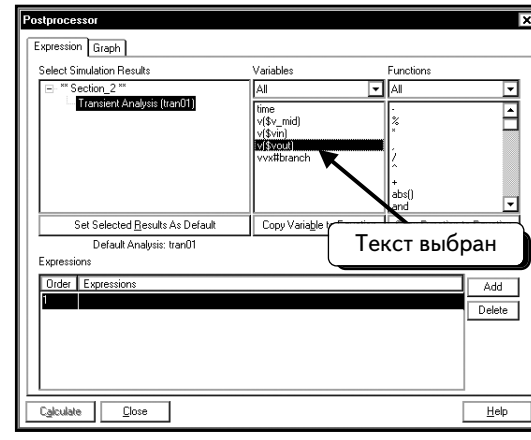
Нажмем кнопку **Add**, чтобы создать новое выражение:



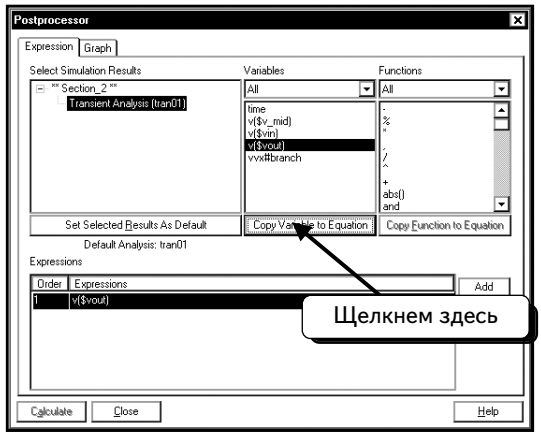


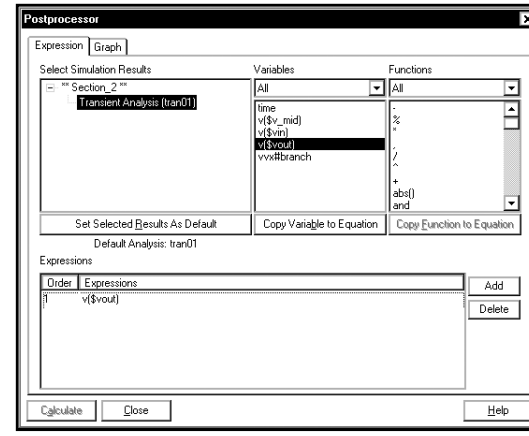
Щелкнем по переменной **v($vout)**, чтобы выделить текст:



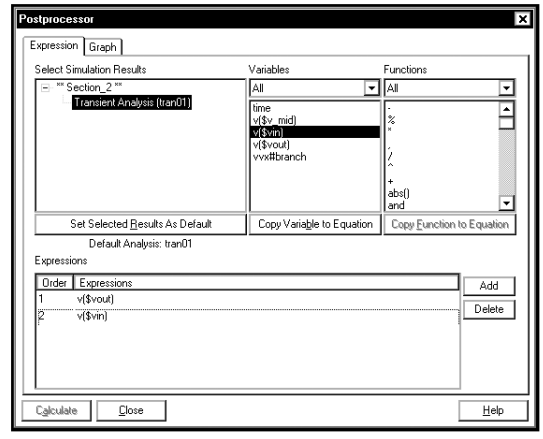


Нажмем кнопку **Copy Variable to Equation (Копировать переменную в уравнение)**:

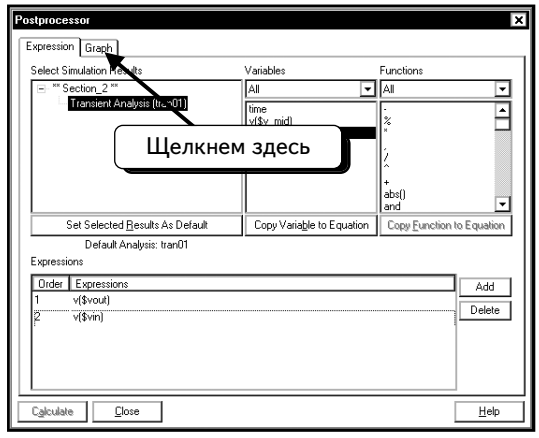


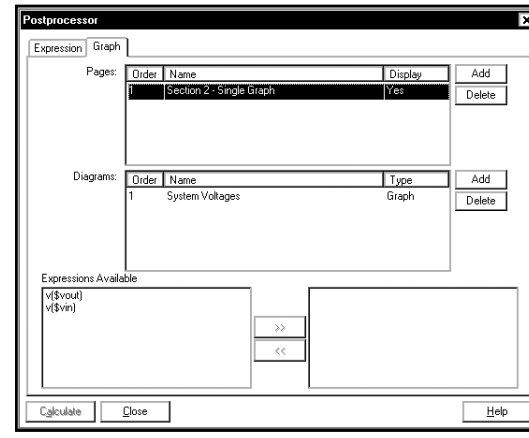


Нажмем кнопку ***Add***, чтобы создать второе выражение. Повторим вышеописанную процедуру, чтобы создать выражение для переменной **v($vin)**:

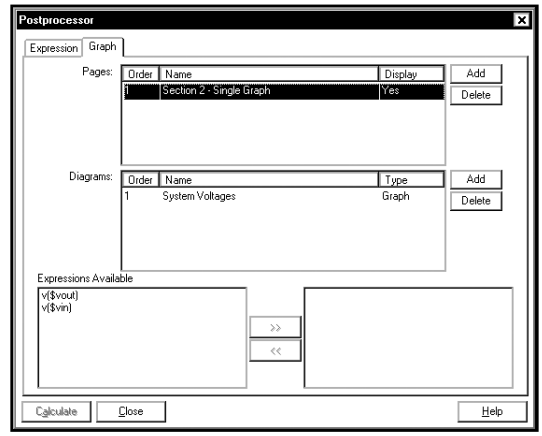


Теперь созданы выражения для построения графика. Щелкнем по вкладке ***Graph* (График)**:

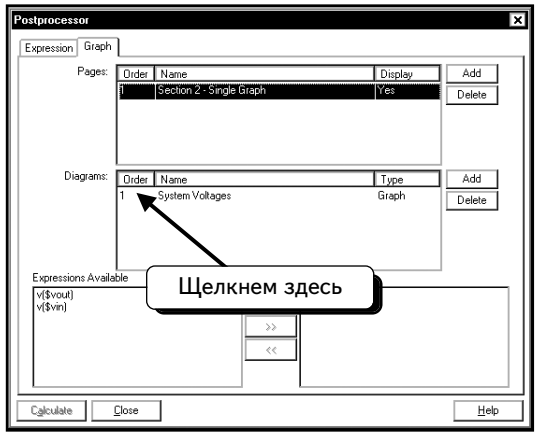


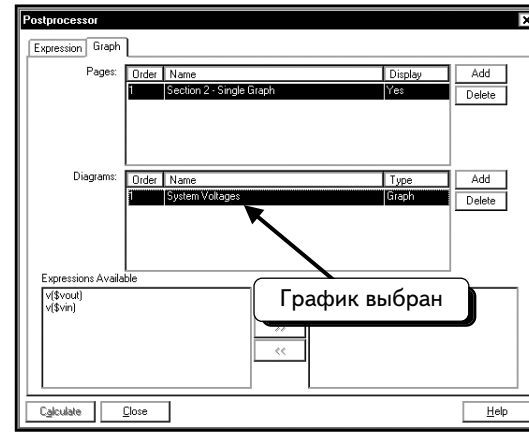


Сейчас мы находимся на этапе, с которого могли бы начать, если бы не пришлось добавлять выражения:

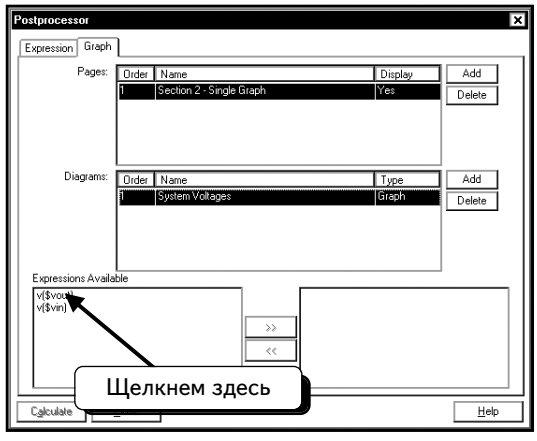


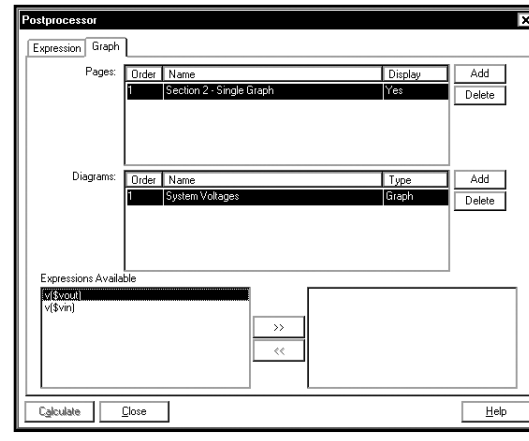
Выберем график. Щелкнем по символу **1**:



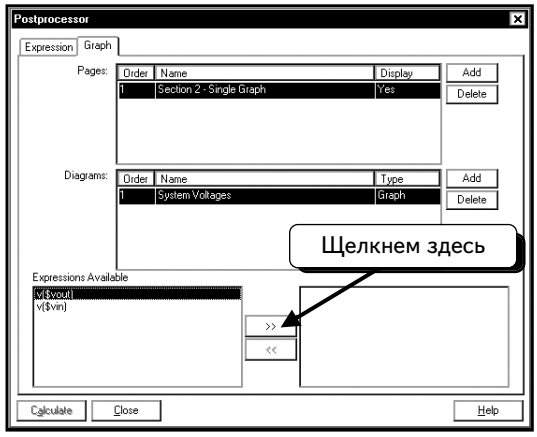


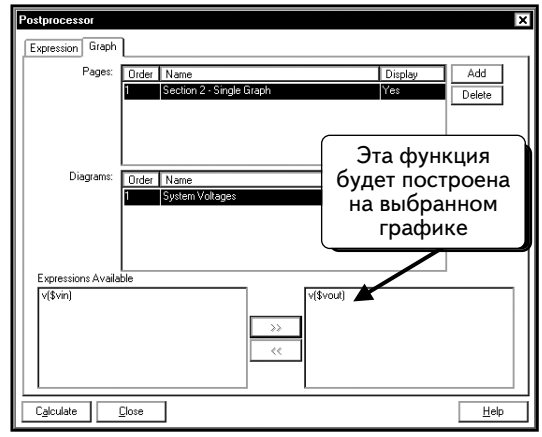
Теперь можно добавить кривые в выделенный график. Щелкнем по переменной **v($vout)**, чтобы выбрать выражение:



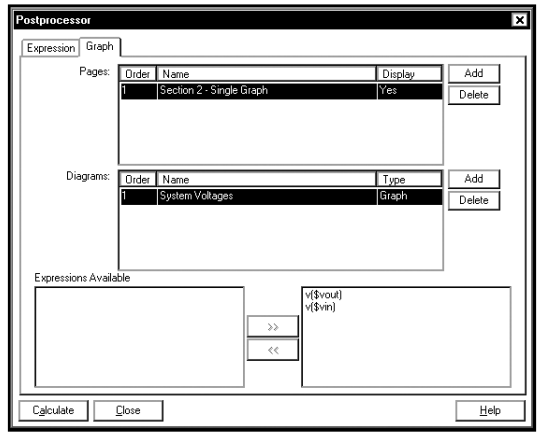


Щелкнем по кнопке , чтобы добавить выражение в график:

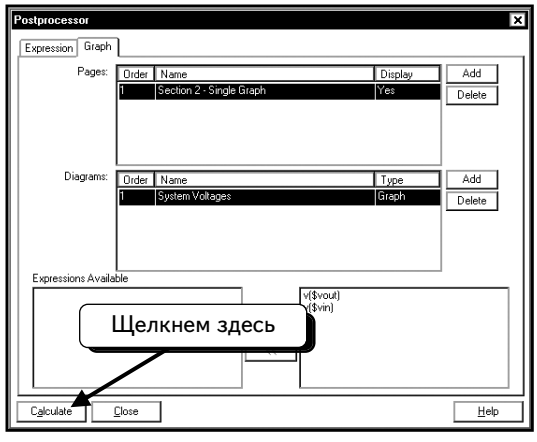


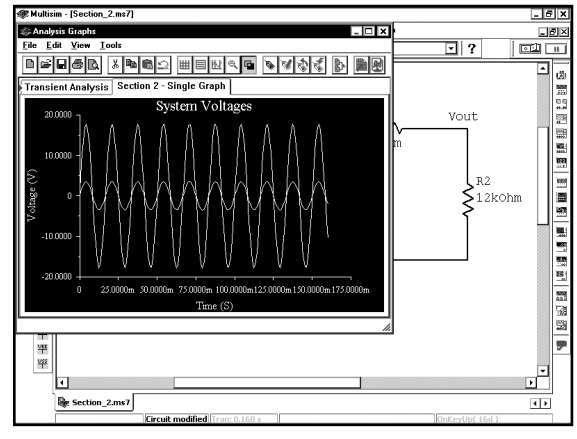


Повторим вышеописанные действия, чтобы добавить на правую панель выражение **v($vin)**:

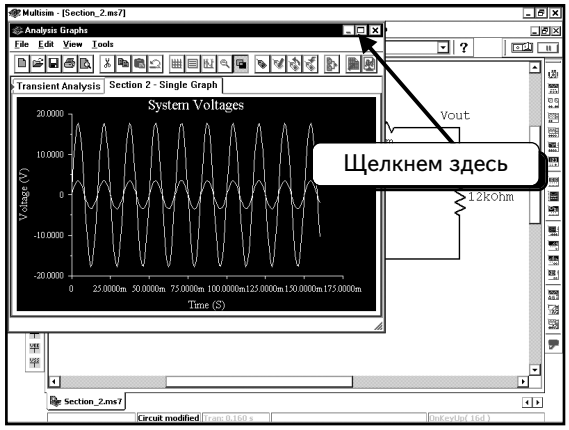


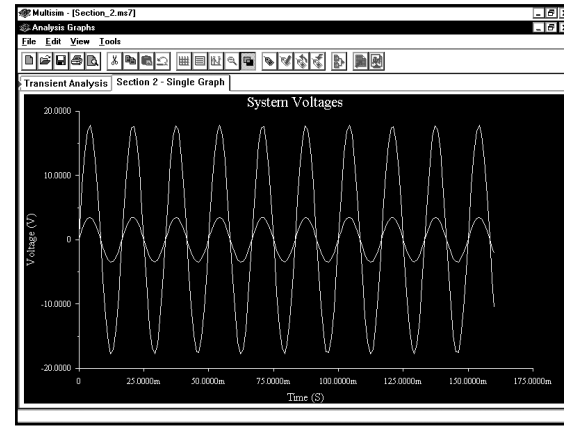
Диаграммы переменных ***Vin*** и ***Vout*** будут строиться на графике ***System Voltages*** на странице ***Section 2 — Single Graph***. При желании можно добавить другие кривые. Однако сейчас продолжим операции, позволяющие увидеть две подготовленные диаграммы. Для этого нажмем кнопку ***Calculate*** **(Рассчитать)**:



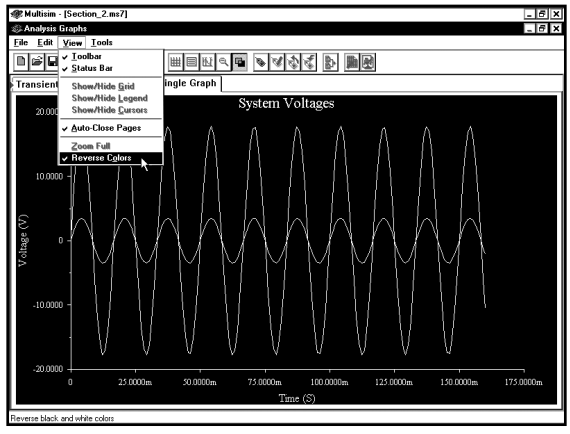


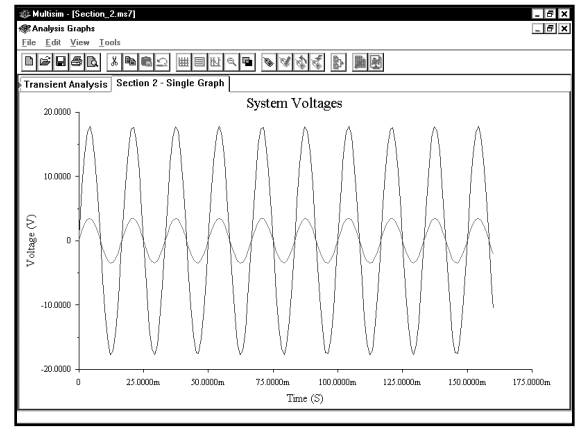
Чтобы развернуть окно **Grapher** на весь экран, щелкнем по иконке :





Обратите внимание: все диаграммы имеют черный фон. Это очень удобно при работе на компьютере, но при создании скриншотов результаты будут не слишком хорошими. Поэтому научимся изменять настройки цвета. Выберем в меню пункты **View ⇒ Reverse Colors (Вид ⇒ Обратить цвета)**:





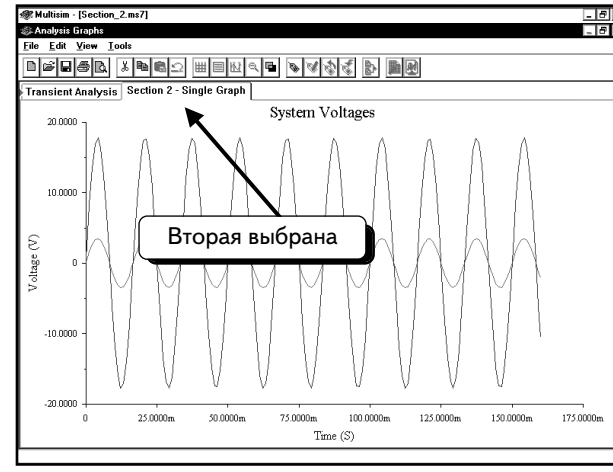
Это изменение не является обязательным, тем не менее, все скриншоты из программы Grapher в этой книге были созданы после модификации цвета фона, что позволило сделать их более четкими. Многие другие инструменты, отображающие результаты в графическом виде, поддерживают функцию обращения цвета.

Теперь в окне Grapher содержатся две вкладки, по одной для каждого графика (или страницы, созданной функцией Postprocessor):

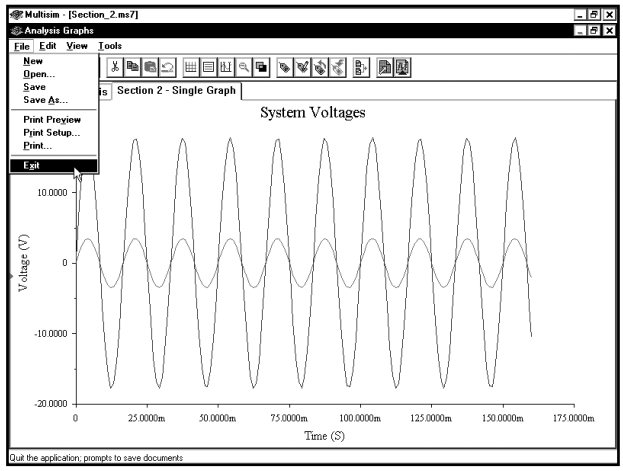


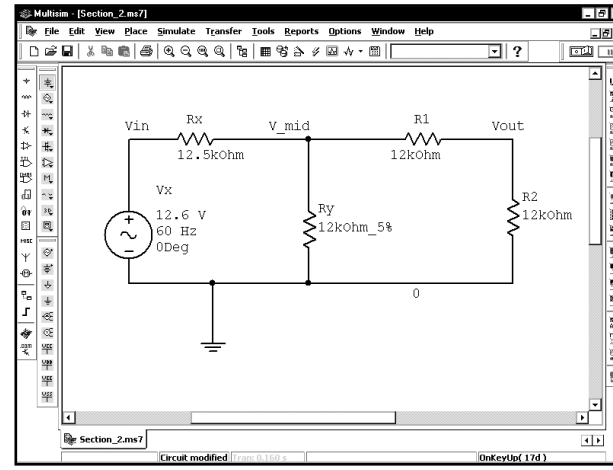
Первая страница была создана автоматически при запуске моделирования, а вторая была добавлена нами в программе Postprocessor. Можно открыть любую страницу, щелкнув по ее вкладке:



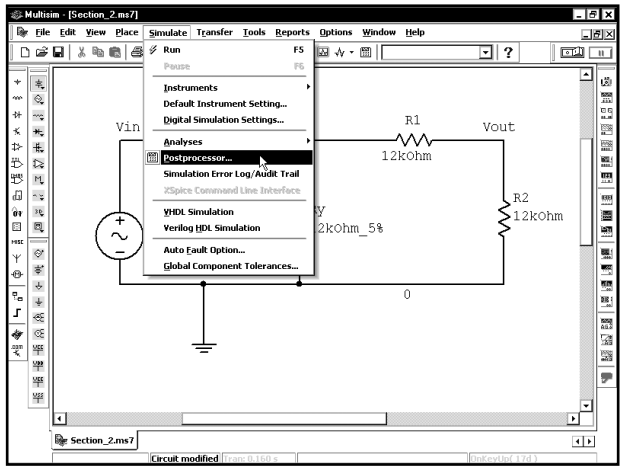


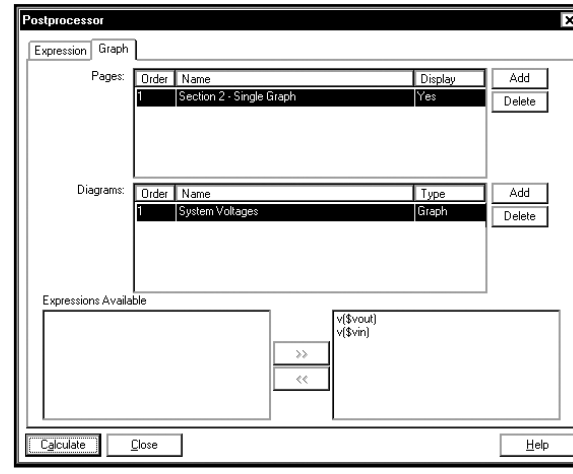
В последующих главах будет рассказано о том, как редактировать графики. Пока же только добавляем кривые и создаем страницы. Добавим в график третью кривую. Для этого нужно закрыть окно Grapher и открыть программу Postprocessor. Выберем в меню пункты **File ⇒ Exit (Файл ⇒ Выйти)**:



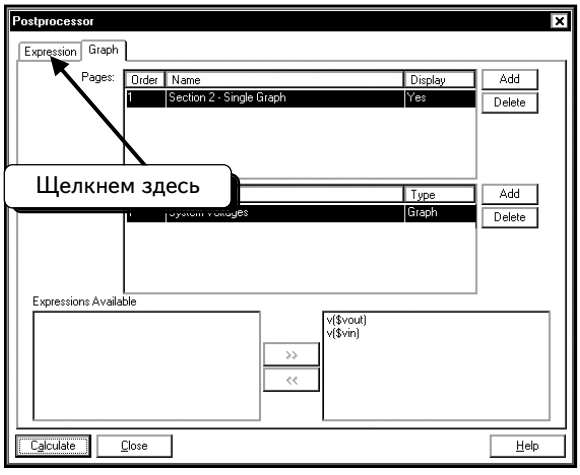


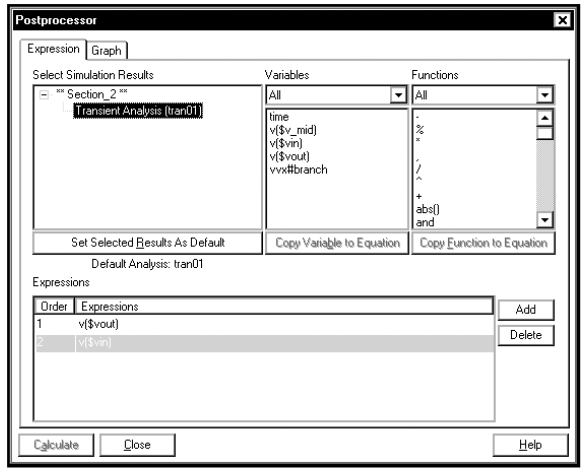
Далее выберем пункты меню **Simulate ⇒ Postprocessor**, чтобы открыть окно Postprocessor:



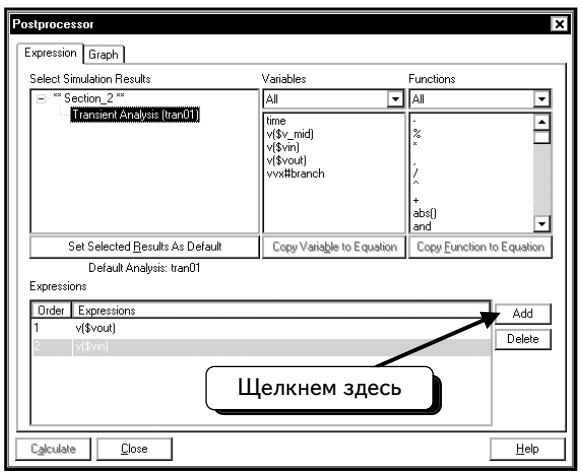


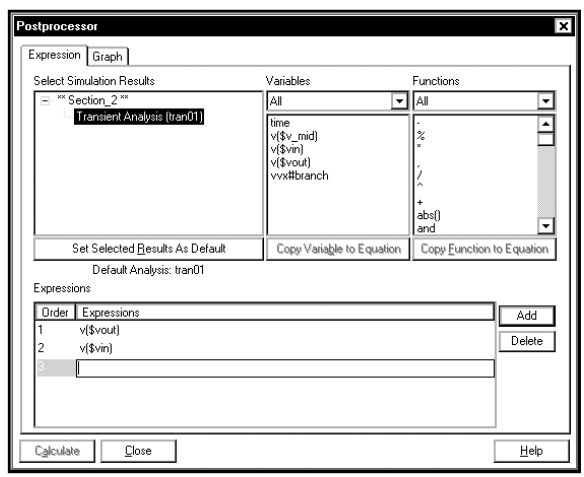
Мы хотим отобразить напряжение **V_mid**, но эта переменная отсутствует в списке выражений. Чтобы добавить выражение, щелкнем по вкладке ***Expression***:



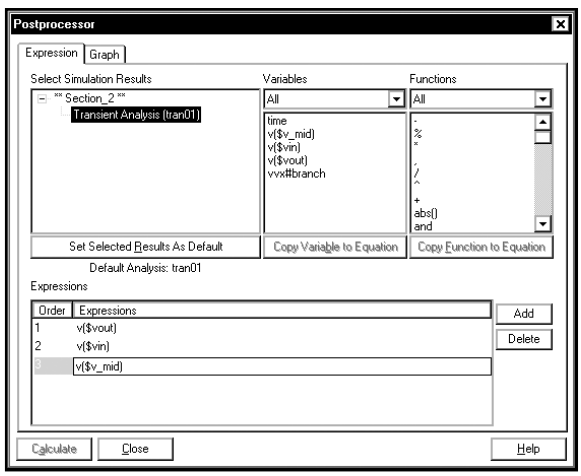


Необходимо создать новое выражение, для этого нажмем кнопку ***Add***:.

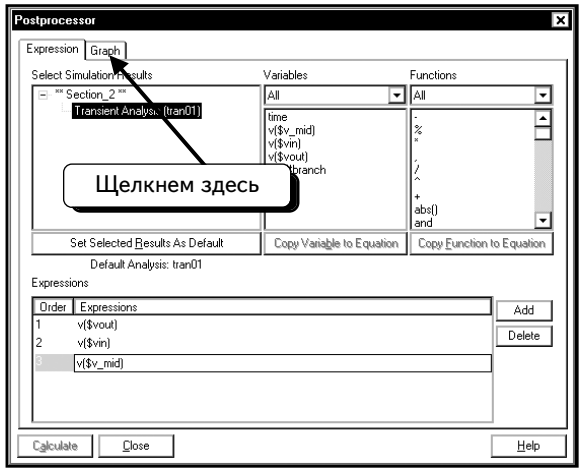


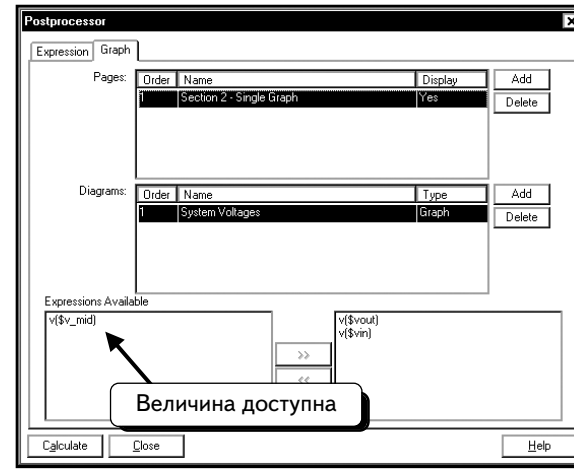


Впоследствии будет показано, как создавать сложные математические выражения. Сейчас достаточно отобразить напряжение для переменной v_mid. Введем текст **`v($v_mid)`**:

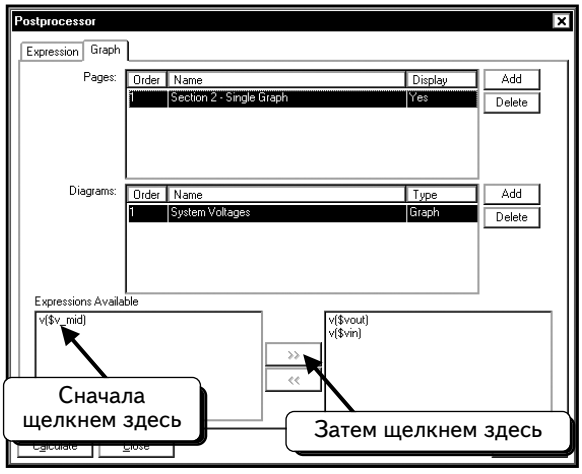


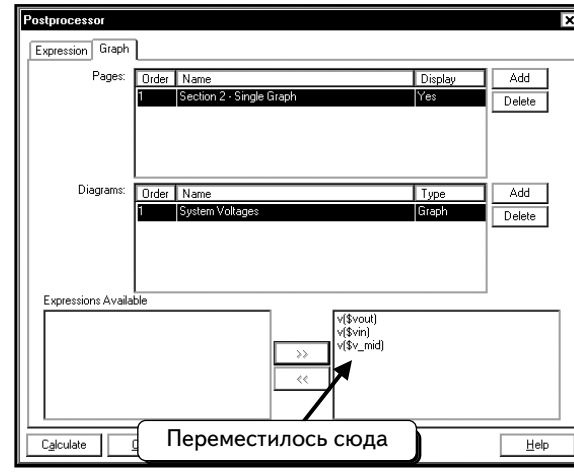
Это позволяет просто вывести кривую. Щелкнем по вкладке **Graph**:



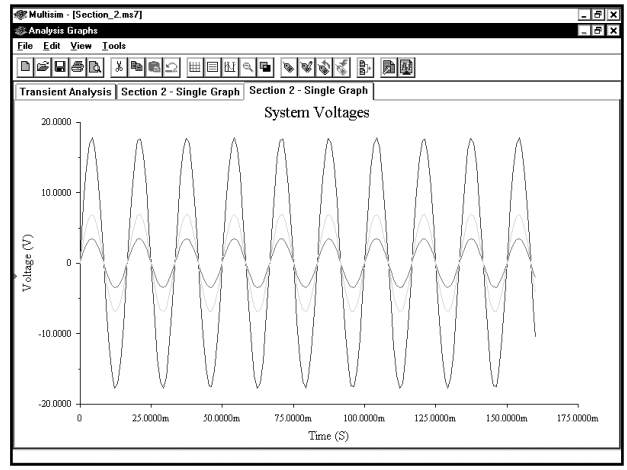


Теперь выражение появилось в списке переменных, и можно получить кривую на графике. Щелкнем по выражению, а затем нажмем кнопку [>>]. Выражение будет выбрано для построения кривой:



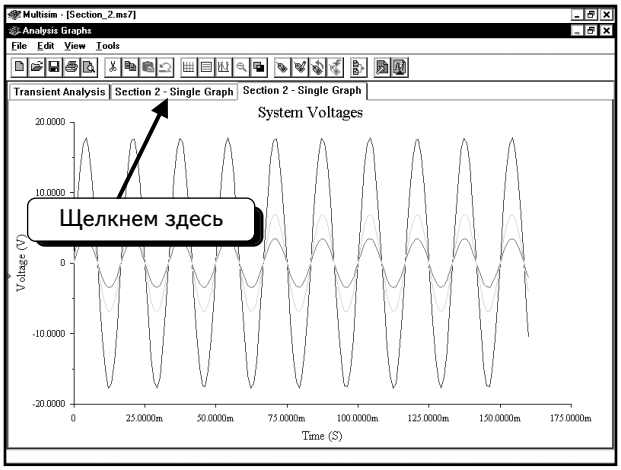


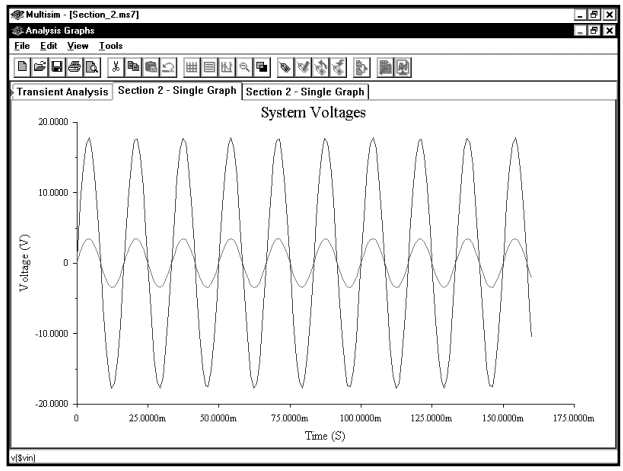
Нажмем кнопку **Calculate**, чтобы создать график:



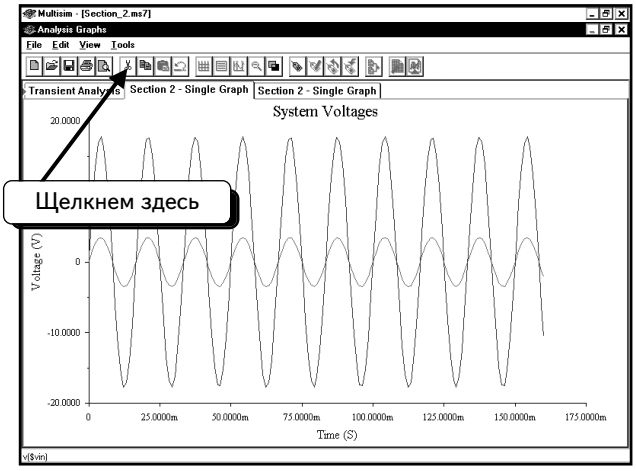
Как видно на экране, создана новая вкладка, на которой график содержит три кривые.

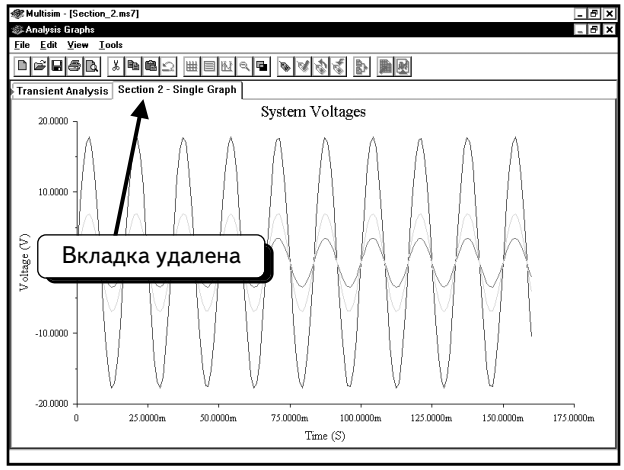
В окне Graph можно создать три вкладки. Если нажать кнопку **Calculate**, это никак не повлияет на существующие страницы. Будет создана новая страница, которая содержит все изменения. Щелкнув по первой вкладке, увидим первую созданную нами страницу:





Если хотим сохранить эту страницу, просто не надо ничего делать, если надо удалить страницу, нажмем кнопку **Cut (Вырезать)**, и страница будет удалена:

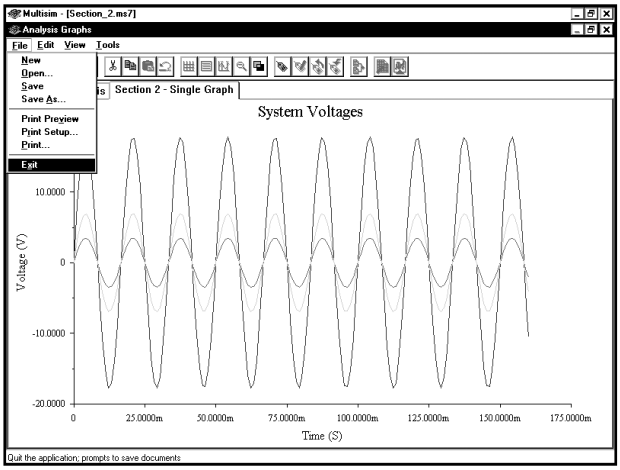


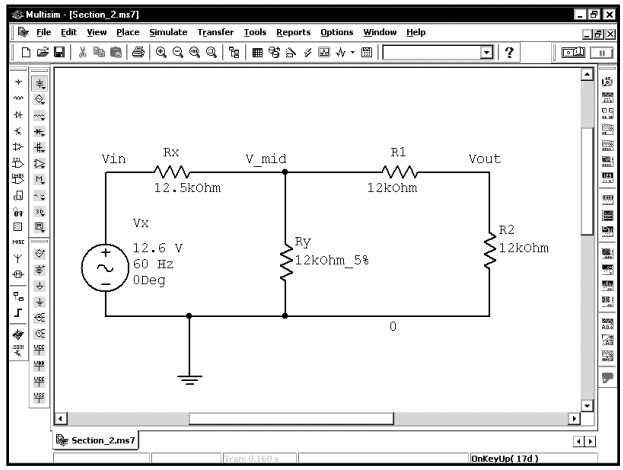


В окне останутся две вкладки. С помощью этого метода можно удалять устаревшие страницы в программе Grapher. После нескольких сеансов моделирования в окне Grapher, возможно, появится несколько графиков, которые не нужны. Удалим их.

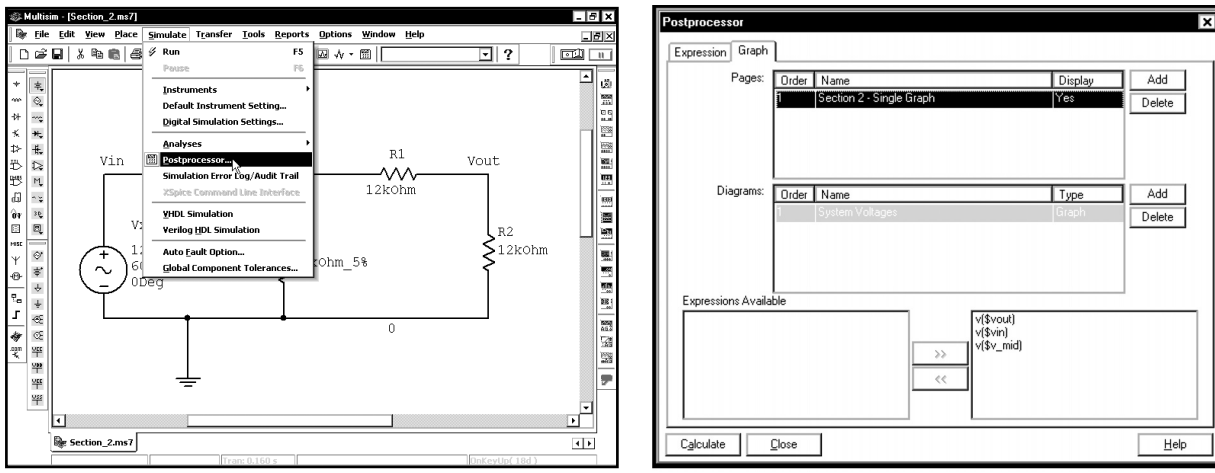
2.2. Создание двух графиков с кривыми

В следующем примере будет создана новая страница Grapher с двумя графиками. Предположим, что надо продолжить работу с примером из предыдущего раздела. Закроем окно Grapher, выбрав в меню пункты **File** ⇒ **Exit**:

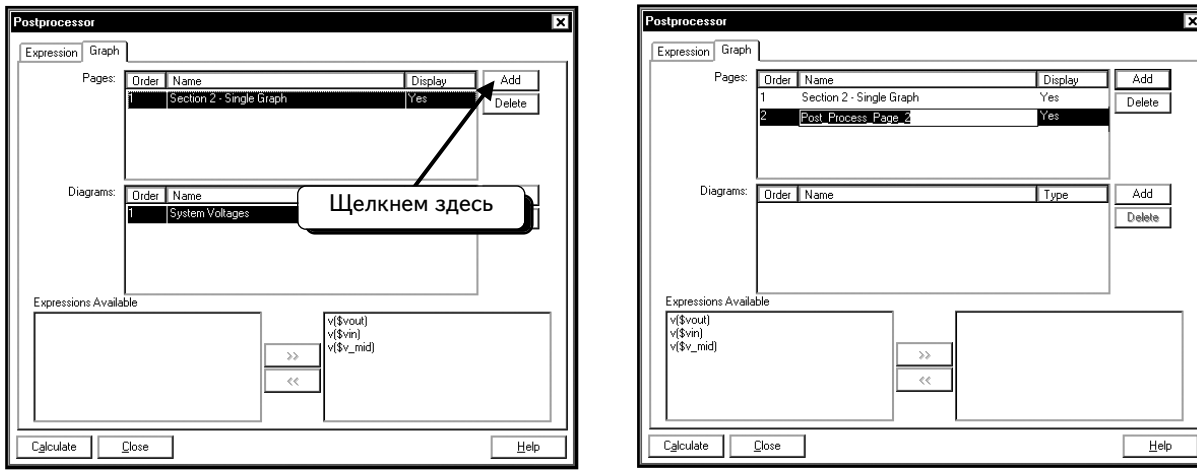




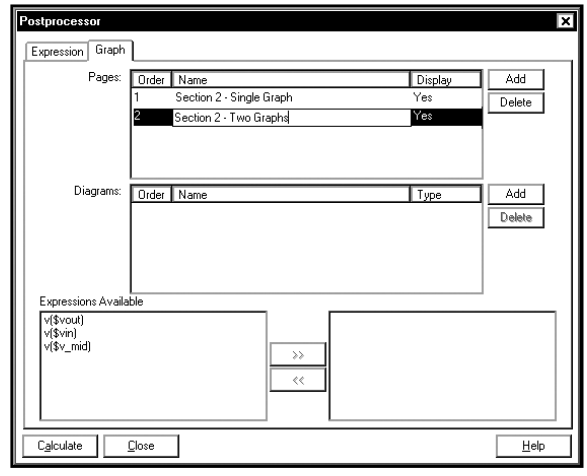
Теперь откроем программу Postprocessor, выбрав в меню Multisim 7 пункты **Simulate** ⇒ **Postprocessor**:



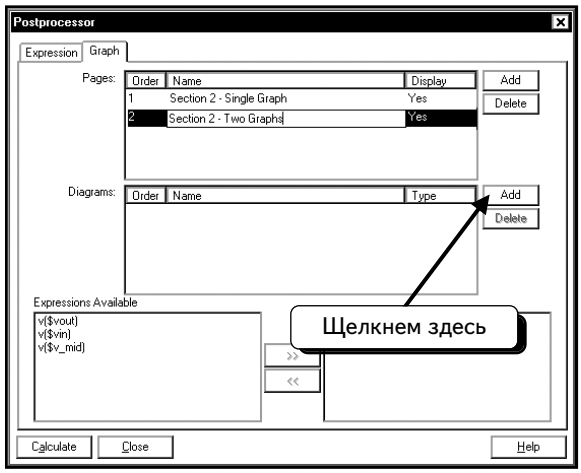
Мы хотим сохранить первую страницу с одним графиком, а также создать новую страницу с двумя графиками. Для этого построим новый график. Нажмем кнопку **Add**, чтобы создать новую страницу в программе Grapher:

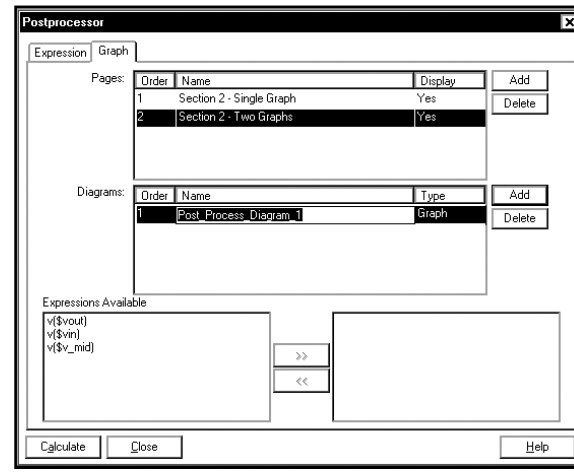


Название страницы будет выделено, поэтому можно ввести вместо него новое название. Введем название страницы — **`Section 2 — Two Graphs:`**

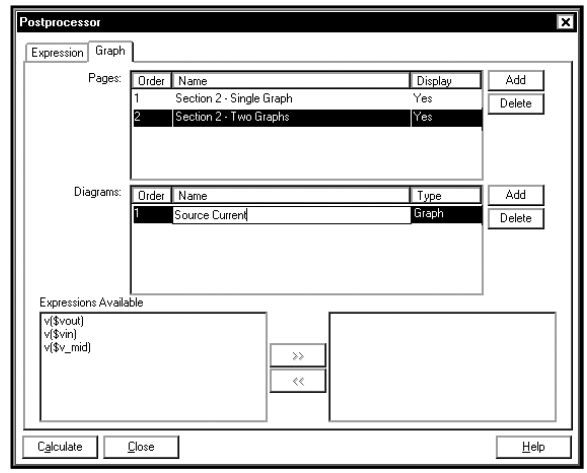


Нажмем кнопку **Add**, чтобы создать на странице новый график:

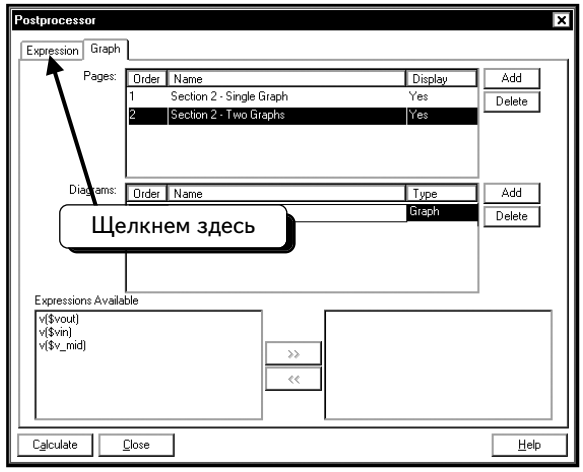


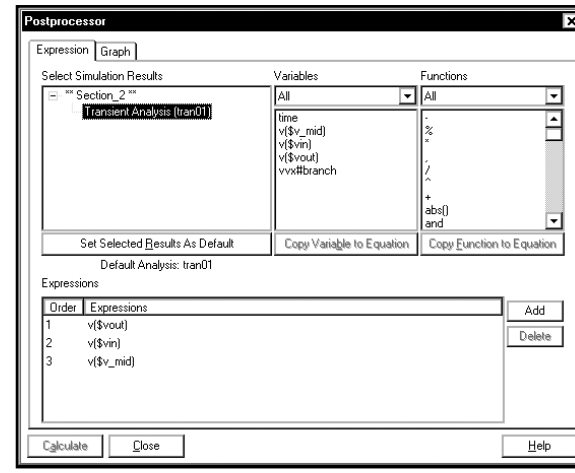


На этой странице отобразим входное напряжение и ток для источника Vx на двух различных графиках. Первый — это график тока (введем его название: **`Source Current`**). Название графика выделено, поэтому можно ввести вместо него новое название:

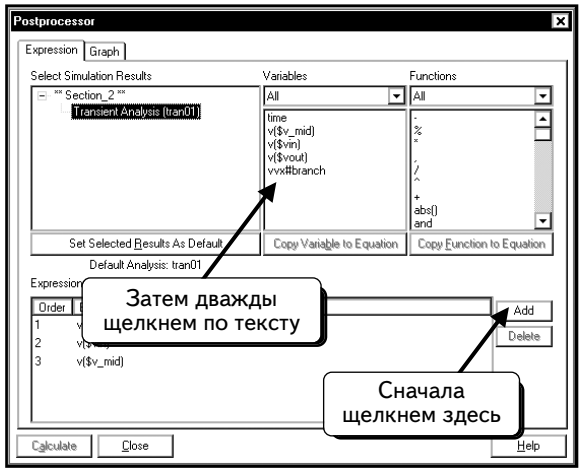


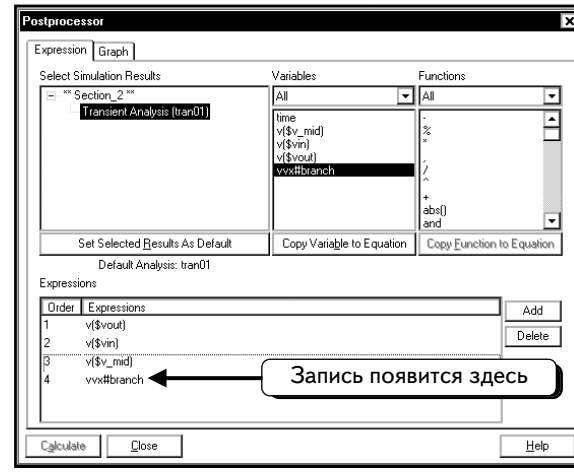
Сейчас выделена страница ***Section 2 — Two Graphs***, а также график ***Source Current***. Любые новые кривые будут добавляться на текущий график. Отобразим на данном графике ток источника. К сожалению, это выражение отсутствует в списке. Щелкнем по вкладке ***Expression***:



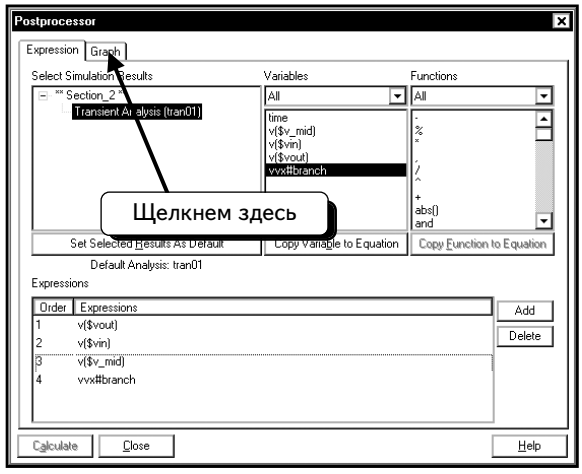


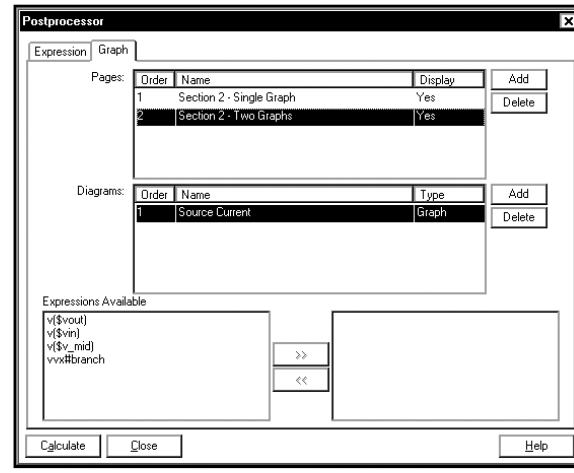
Нажмем кнопку **Add**, чтобы создать новое выражение. Дважды щелкнем по переменной **vvx#branch:**



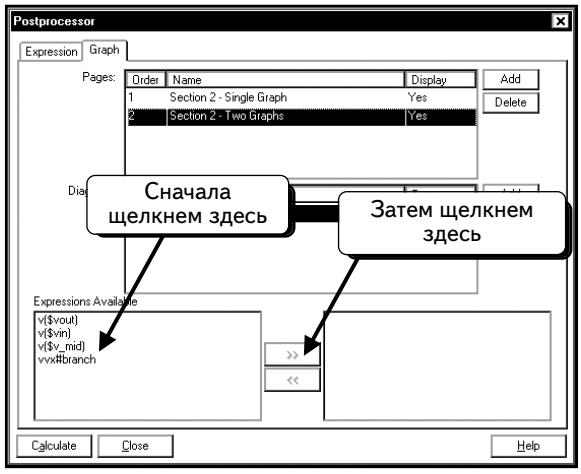


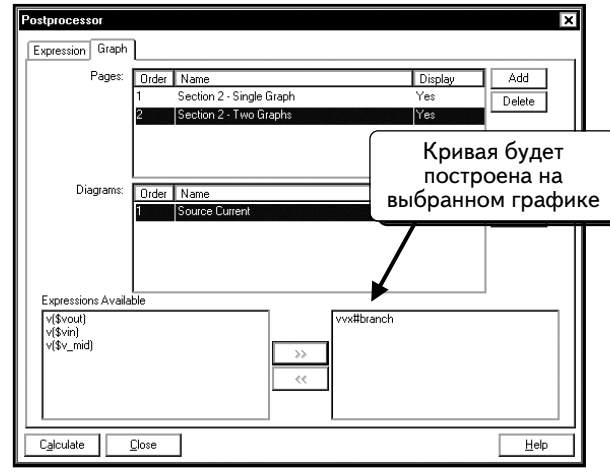
Щелкнем по вкладке **Graph**:



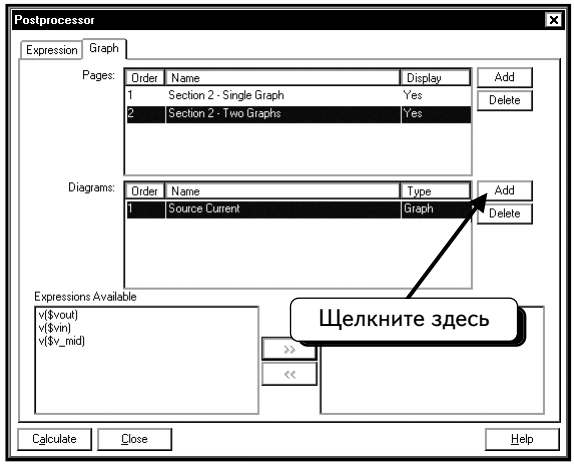


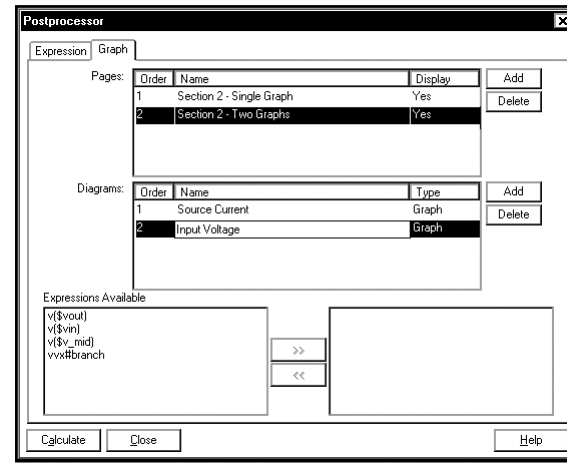
Обратите внимание: сейчас выбраны страница **Section 2 — Two Graphs** и диаграмма **Source Current**. Любая новая кривая будет отображаться на этой странице и на этом графике. Для того чтобы добавить кривую тока, щелкнем по переменной **vvx#branch,** а затем нажмем кнопку [>>] :
Теперь кривая будет добавлена в список на правой панели и выбрана для построения на выделенном графике.



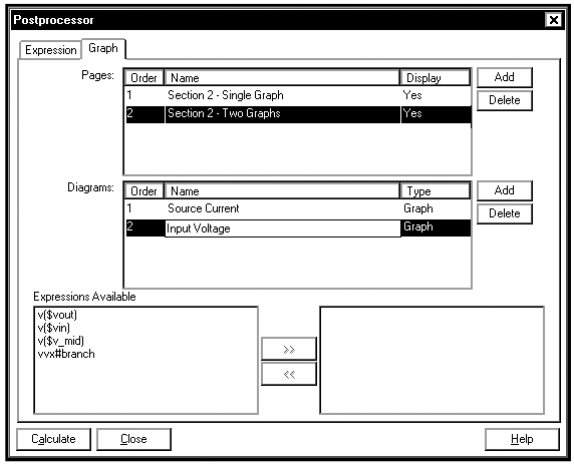


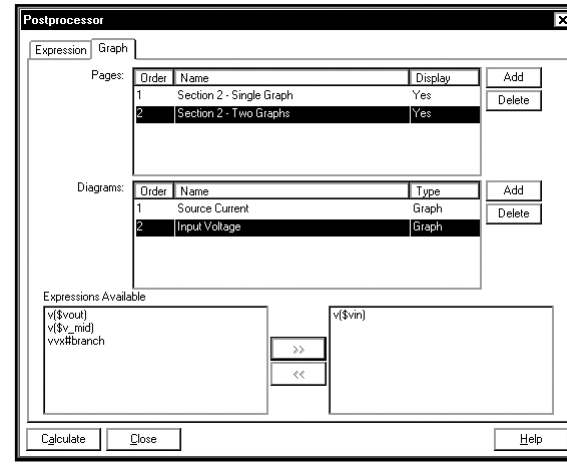
Создадим на выбранной странице **Section 2 — Two Graphs** второй график. Нажмем нижнюю кнопку **Add** и введем название графика, например `Input Voltage`:



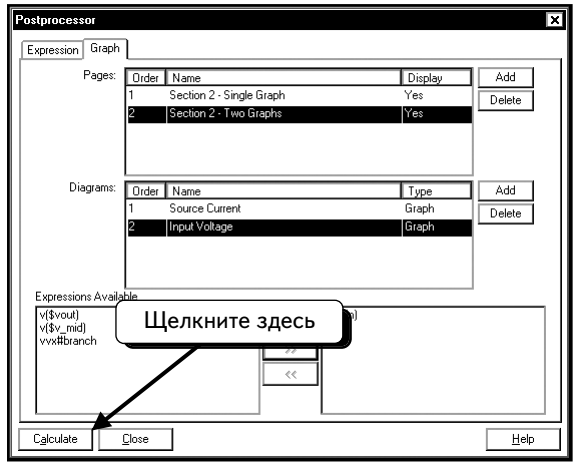


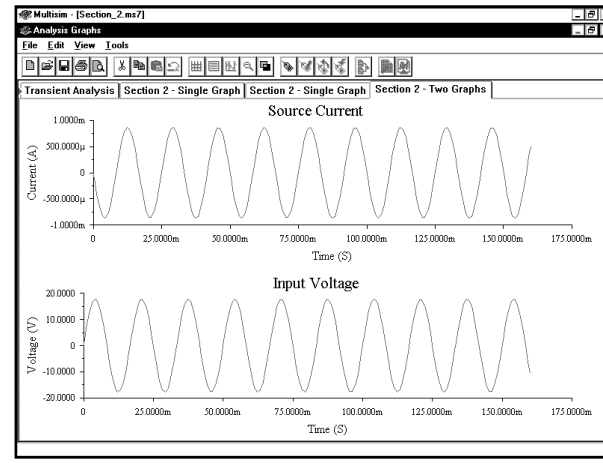
Сейчас выбраны страница **Section 2 — Two Graphs** и диаграмма **Input Voltage**. Любая новая кривая будет отображаться на этой странице и на этом графике. Для того чтобы добавить кривую входного напряжения, щелкнем по переменной **v($vin)**, а затем нажмем кнопку [>>] :





Теперь кривая будет добавлена в список на правой панели и выбрана для отображения на выделенном графике. Мы подготовили всё, для того чтобы вывести график на страницу. Выведем изображение страницы, нажав кнопку **Calculate**:

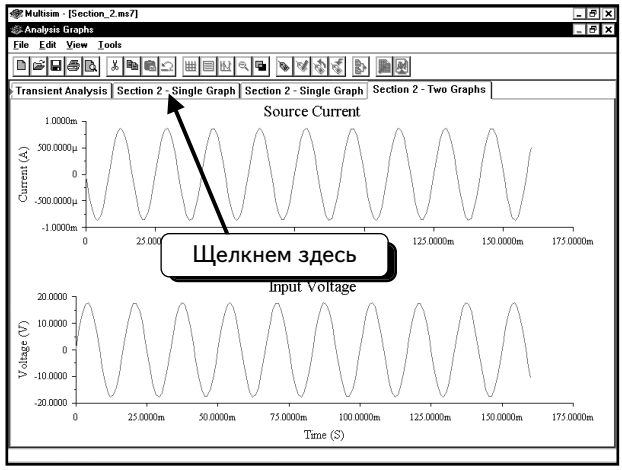


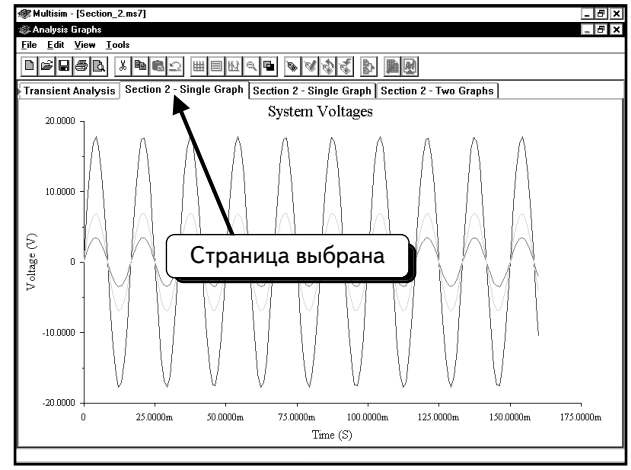


Страница выглядит именно так, как ожидалось. Отметим, что ток в ветви считается положительным, если он втекает в положительный полюс источника питания. Поскольку наша схема питается от источника напряжения, ток вытекает из положительного полюса, если напряжение положительно. Поэтому он показан как отрицательный при положительном напряжении[1].

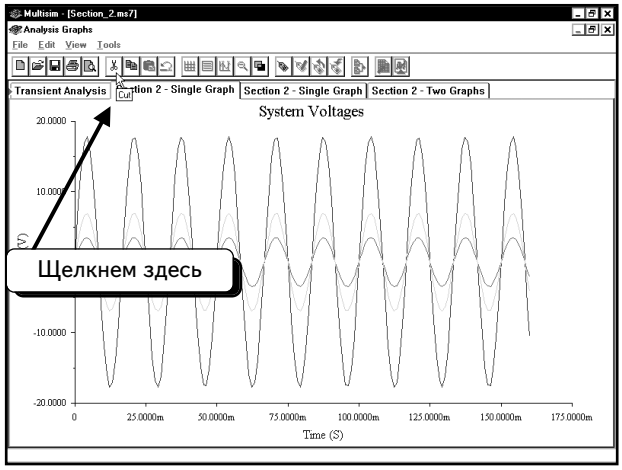
[1] В отечественной электротехнике принято противоположное направление положительного тока, и студентам, изучающим электротехнику по отечественным учебникам, необходимо это учитывать. Таким же было принято направление тока в первых версиях Electronics Workbench. *(Прим. ред.)*

Каждый раз, когда нажимают кнопку Calculate, в программе Postprocessor создается новая страница. В данном примере окно Postprocessor изначально состояло из двух страниц. При нажатии кнопки Calculate в окно Grapher были добавлены обе страницы (а не только текущая). В результате была создана вторая копия страницы ***Section 2 — Single Graph***, так как эта страница уже была добавлена в окно Grapher в предыдущем разделе. Чтобы исправить ошибку, удалим ненужные страницы. Щелкнем по одной из вкладок ***Section 2 — Single Graph***:





Нажмем кнопку ***Cut***, чтобы удалить выбранную страницу:

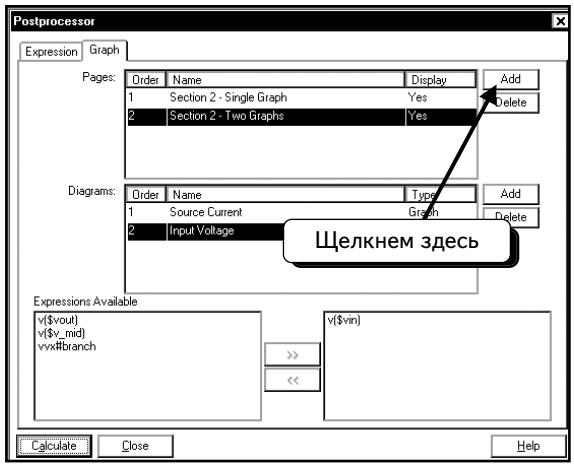


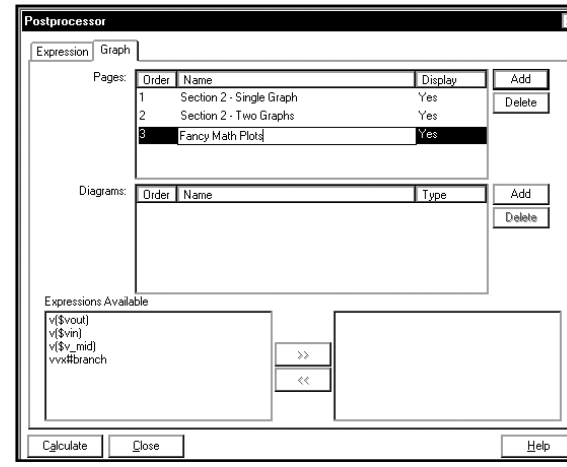


Страница удалена. С помощью данной методики можно удалять многие графики в программе Grapher.

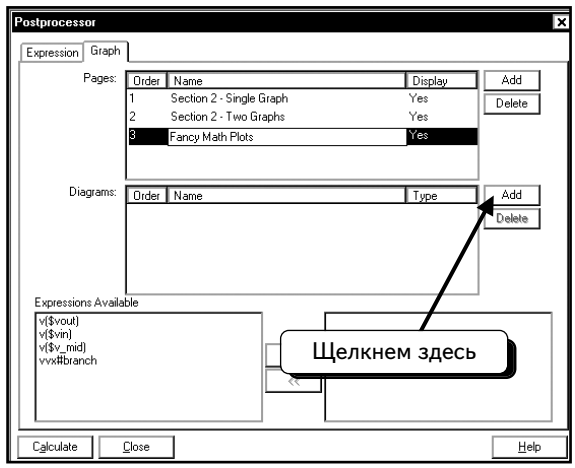
2.3. Создание трех графиков

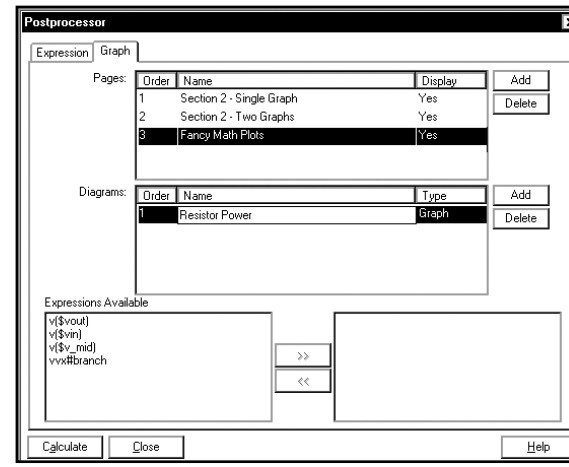
В качестве последнего примера, создадим новую страницу с тремя графиками. На этой странице отобразим также математические функции, доступные в программе Postprocessor. Выберем пункты меню **File** ⇒ **Exit**, чтобы закрыть окно Grapher, а затем пункты **Simulate** ⇒ **Postprocessor**, чтобы открыть программу Postprocessor. Нажмем кнопку ***Add***, чтобы создать новую страницу переименуем страницу в **`Fancy Math Plots:`**



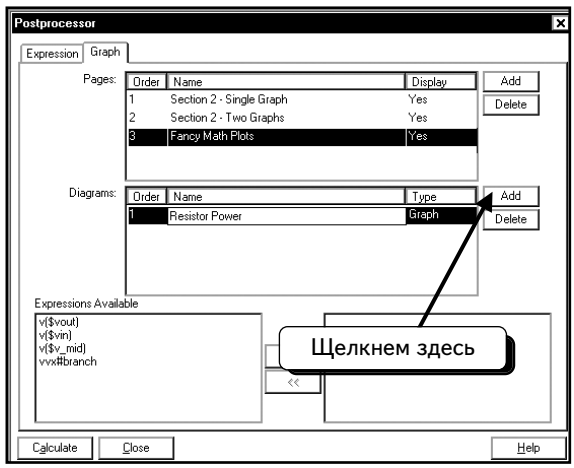


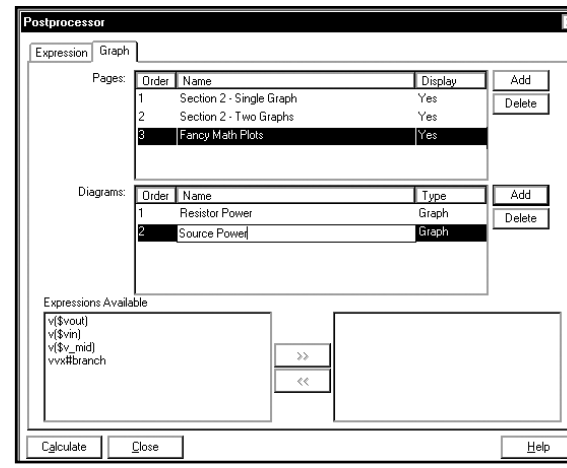
Создадим на этой странице три графика. Нажмем нижнюю кнопку **Add** и введем новое название: **`Resistor Power` (Мощность, рассеиваемая резистором)**:



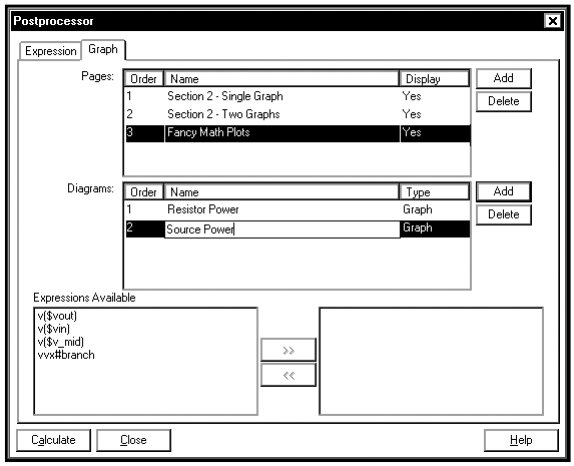


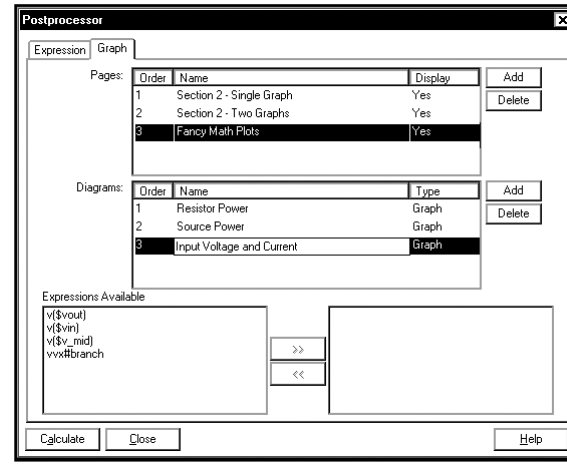
Нажмем нижнюю кнопку **Add** и введем новое название — **`Source Power` (Мощность источника)**:





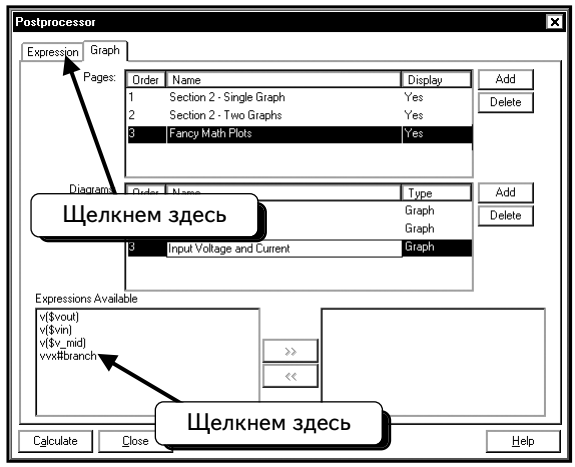
Нажмем нижнюю кнопку **Add** и введем новое название — **`Input Voltage and Current` (Входные ток и напряжение)**:

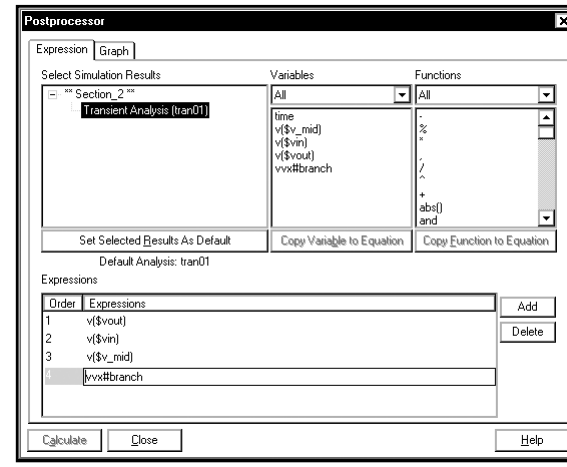




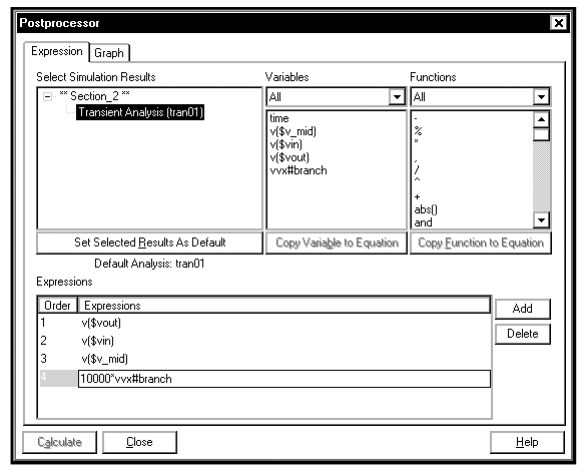
Отобразим ток источника и входное напряжение на одном графике. Трудность заключается в том, что значение тока пропорционально напряжению, но примерно в 10 000 раз меньше его. Чтобы получить кривую тока, которая по масштабу соответствовала бы кривой напряжения, придется умножить значение тока на 10 000 (можно также использовать для кривой тока другую ось y — этот метод описан в разделе 2.6.4). Следует создать новое выражение **10 000* vvx#branch** либо использовать существующее.

Щелкнем по вкладке ***Expression***, а затем выберем выражение ***vvx#branch***:

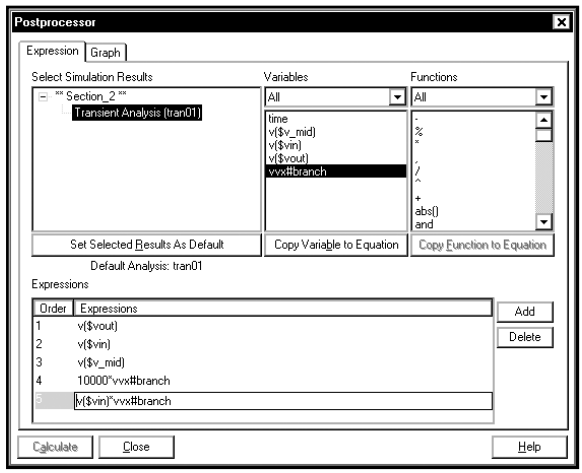




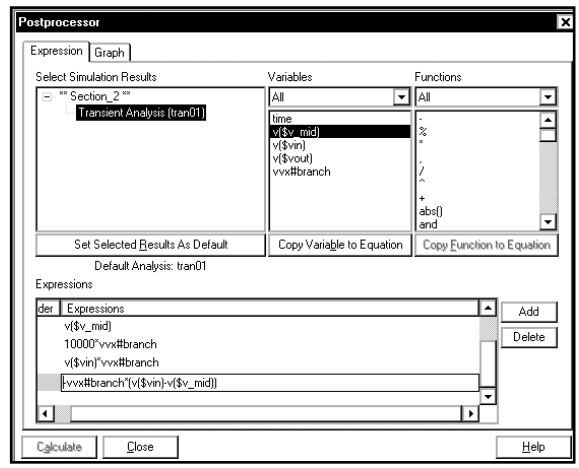
Курсор мыши будет помещен слева от переменной ***vvx#branch***, то есть именно там, где нужно. Достаточно просто ввести текст «**10000***»:



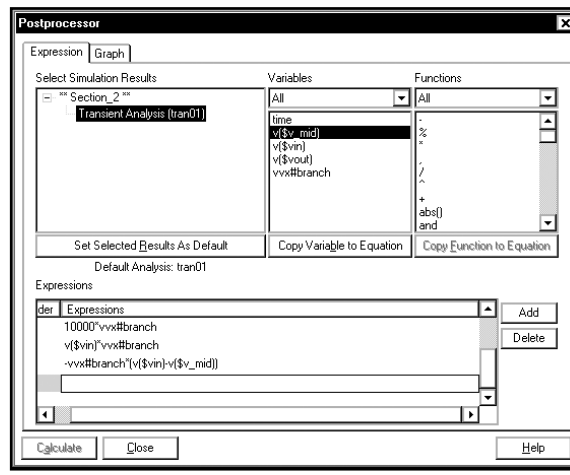
В диалоговом окне ***Expression*** создадим выражения для других кривых. Первая кривая — это напряжение питания, создаваемое источником Vx. В программе Multisim для вычисления мощности питания используется уравнение **v($vin)* vvx#branch**. Нажмем кнопку ***Add***, чтобы создать новое выражение:



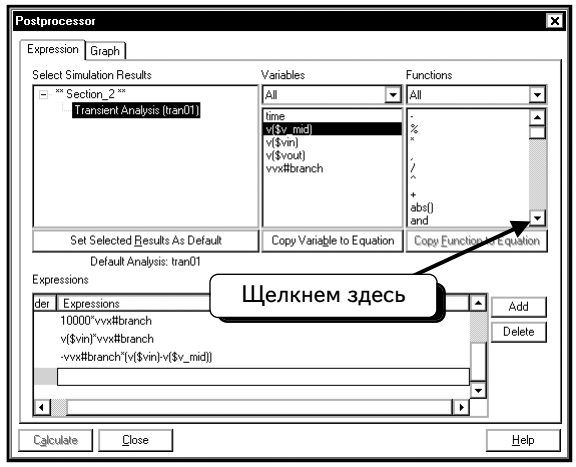
Наконец, мы хотим получить временную диаграмму мощности, рассеиваемой резистором Rx. Это значение равно напряжению на Rx, умноженному на ток, проходящий через Rx, то есть **`vvx#branch*(v($vin)--v($v_mid))`**. Нажмем кнопку ***Add***, чтобы создать новое выражение. Можно ввести все выражение с клавиатуры либо скопировать необходимые переменные, пользуясь мышью и кнопкой **Copy Variable to Equation (Копировать переменную в уравнение),** и ввести недостающие знаки с клавиатуры:

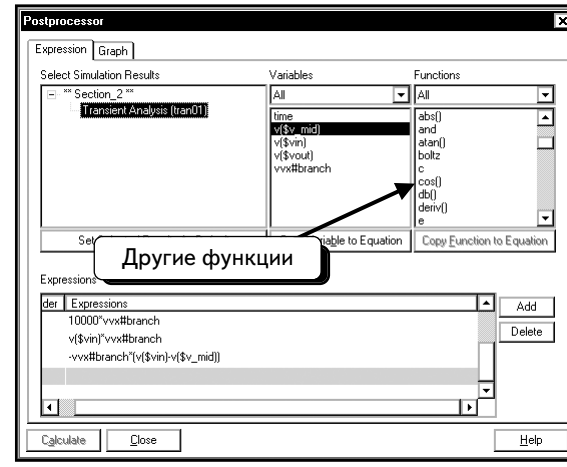


Теперь создадим выражение, по которому рассчитывается среднее значение мощности, рассеиваемой резистором. Программа Multisim не имеет функции усреднения по времени; вместо нее будем использовать функцию расчета среднего значения (mean function). Эта функция рассчитывает среднее значение для всех элементов кривой. В результате полученное число, является средним арифметическим от ординат всех точек этой кривой. Значение можно использовать для расчета среднего значения мощности. Так как функция возвращает одно значение, на графике она отображается прямой линией. Сначала нажмем кнопку ***Add***, чтобы создать новое выражение:

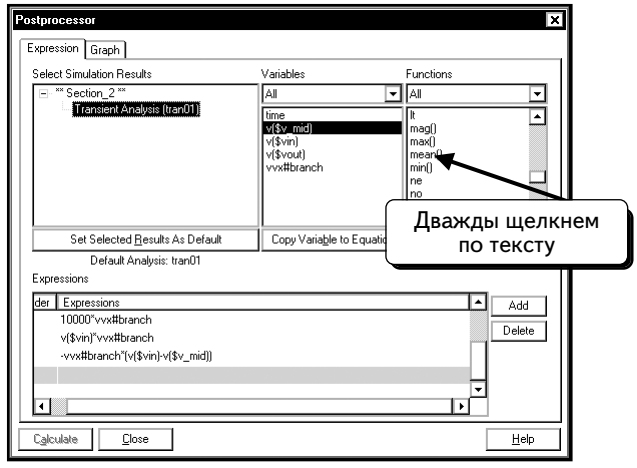


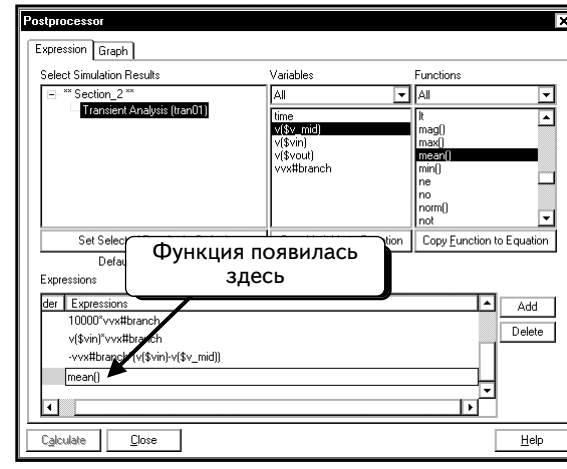
Чтобы просмотреть список доступных функций, щелкнем по символу ▼:



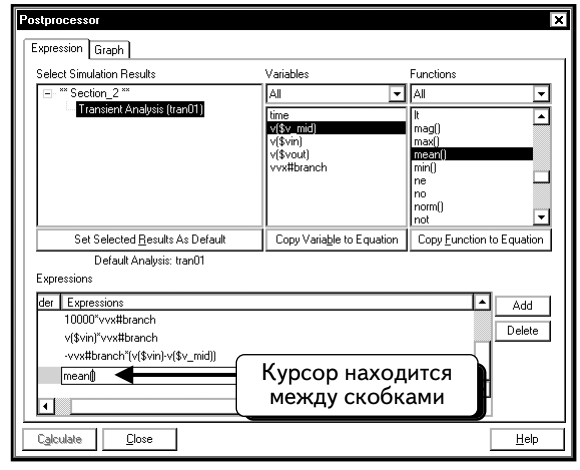


Математические операции, выполняемые некоторыми функциями очевидны, для ряда функций определить их не так просто*. Просмотрим элементы списка и найдем функцию **mean()**. Дважды щелкнем по функции, чтобы добавить ее в новое выражение:



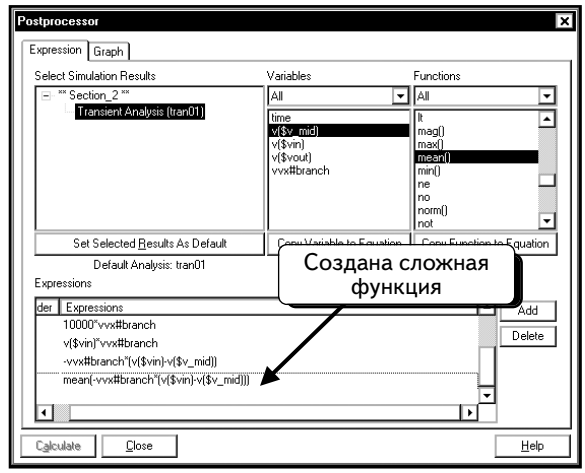


Поместим курсор мыши между скобками:



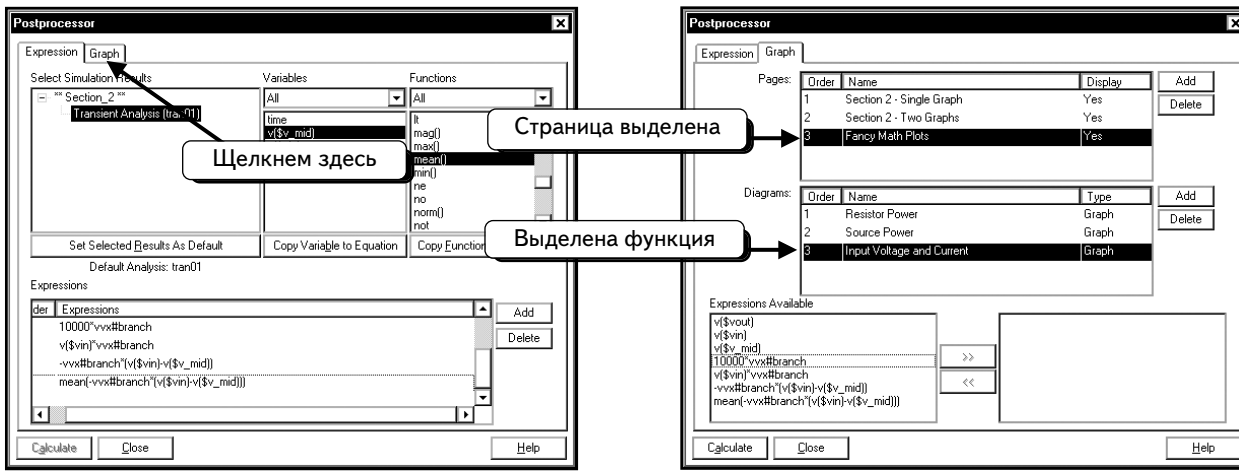
* Чтобы просмотреть список функций и их свойства, нажмите кнопку **Help**.

Теперь можно добавить нужный текст методом, описанным ранее:

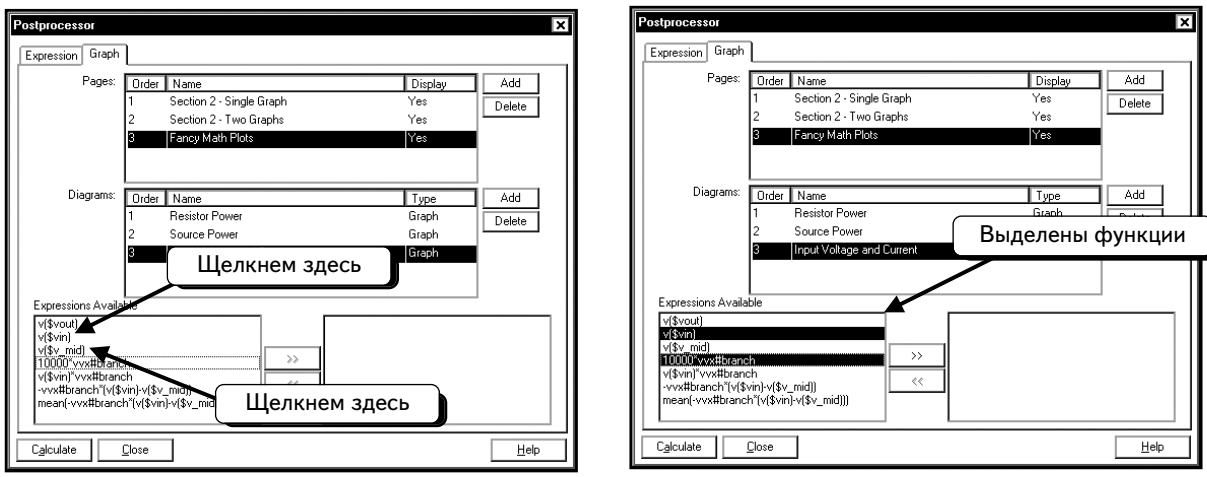


В список добавлены все выражения для будущих графиков.

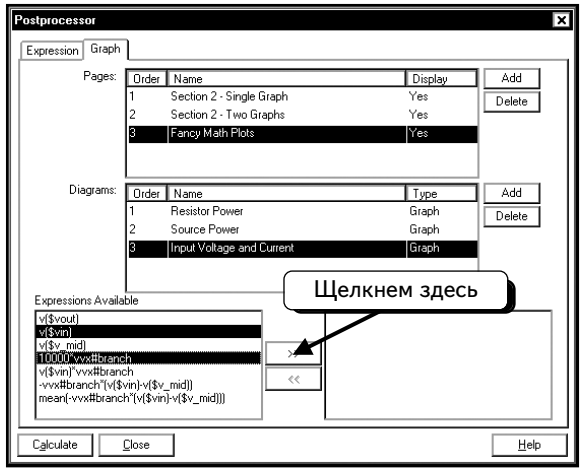
Приступим к формированию набора кривых, которые необходимо вывести. Щелкнем по вкладке **Graph**:

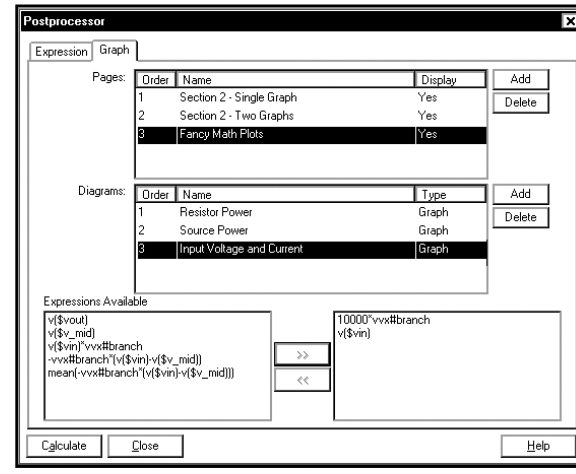


В этом диалоговом окне выбраны страница ***Fancy Math Plots*** и график ***Input Voltage and Current***. Любая новая кривая будет отображаться на этой странице и на этом графике. Необходимо отобразить на этом графике выражения ***v($vin)*** и ***10000*vvx#branch***. Щелкнем по тексту, чтобы выделить выражения:

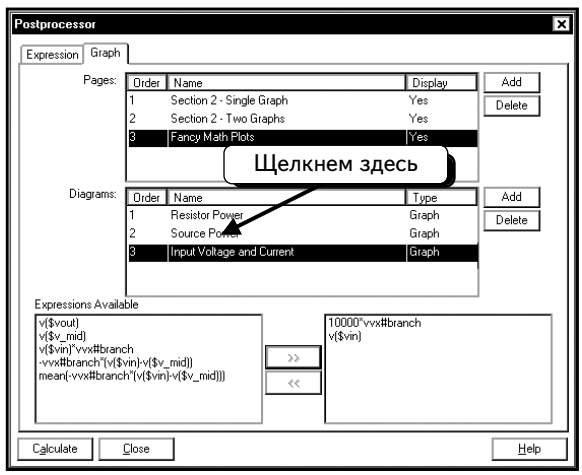


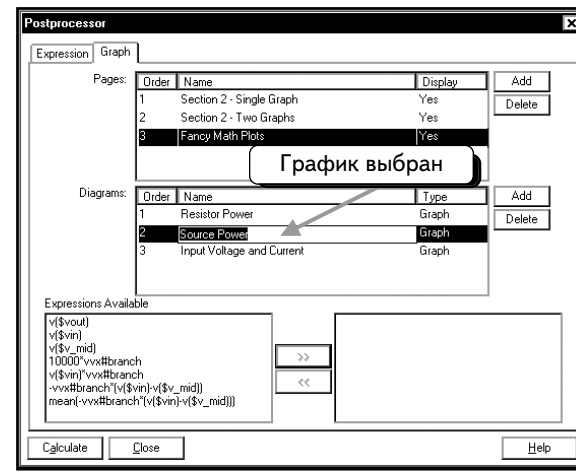
Далее нажмем кнопку [>>], чтобы добавить выделенные выражения в набор кривых, которые будут отображены на выбранном графике:



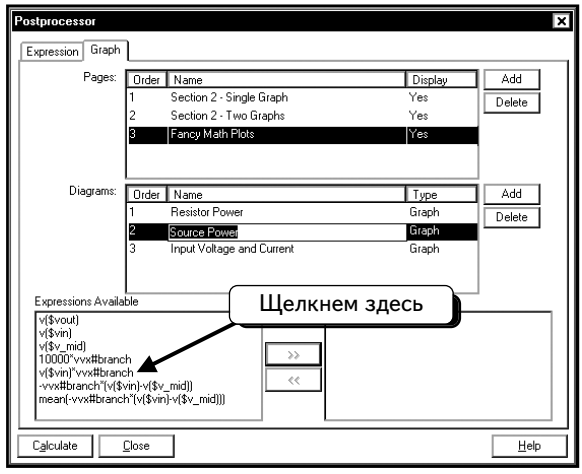


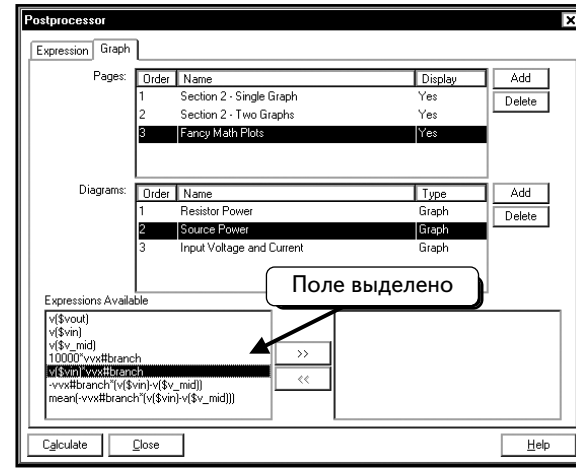
Перейдем к формированию графика, называемого ***Source Power***. Щелкнем по графику ***Source Power***, чтобы выбрать его:



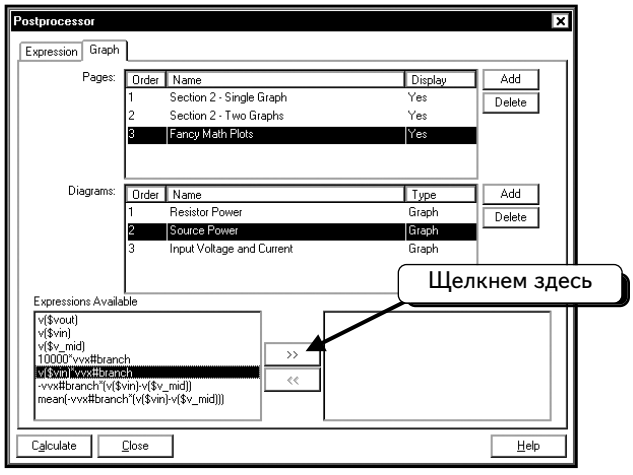


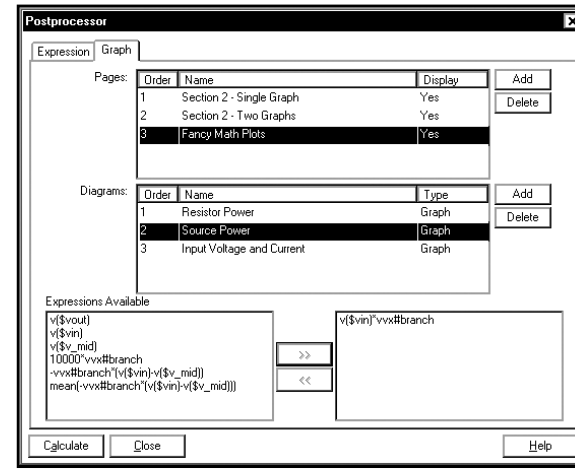
На данном графике отобразим выражение **v($vin)*vvx#branch**. Щелкнем по выражению, чтобы выделить его:



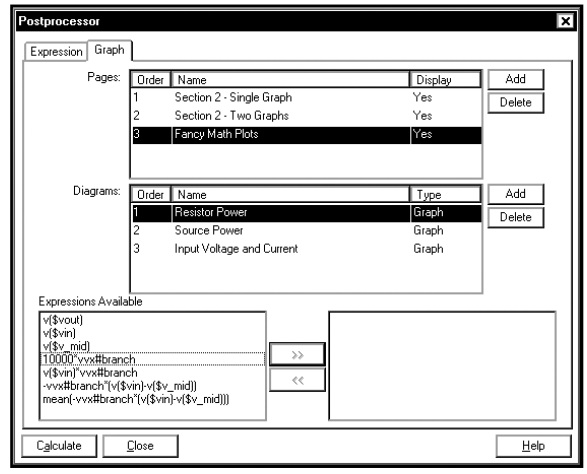


Нажмем кнопку [>>], чтобы ввести выделенное выражение в состав кривых выбранного графика:

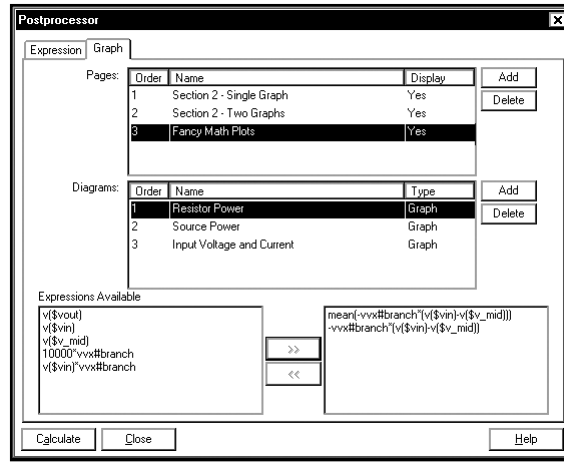




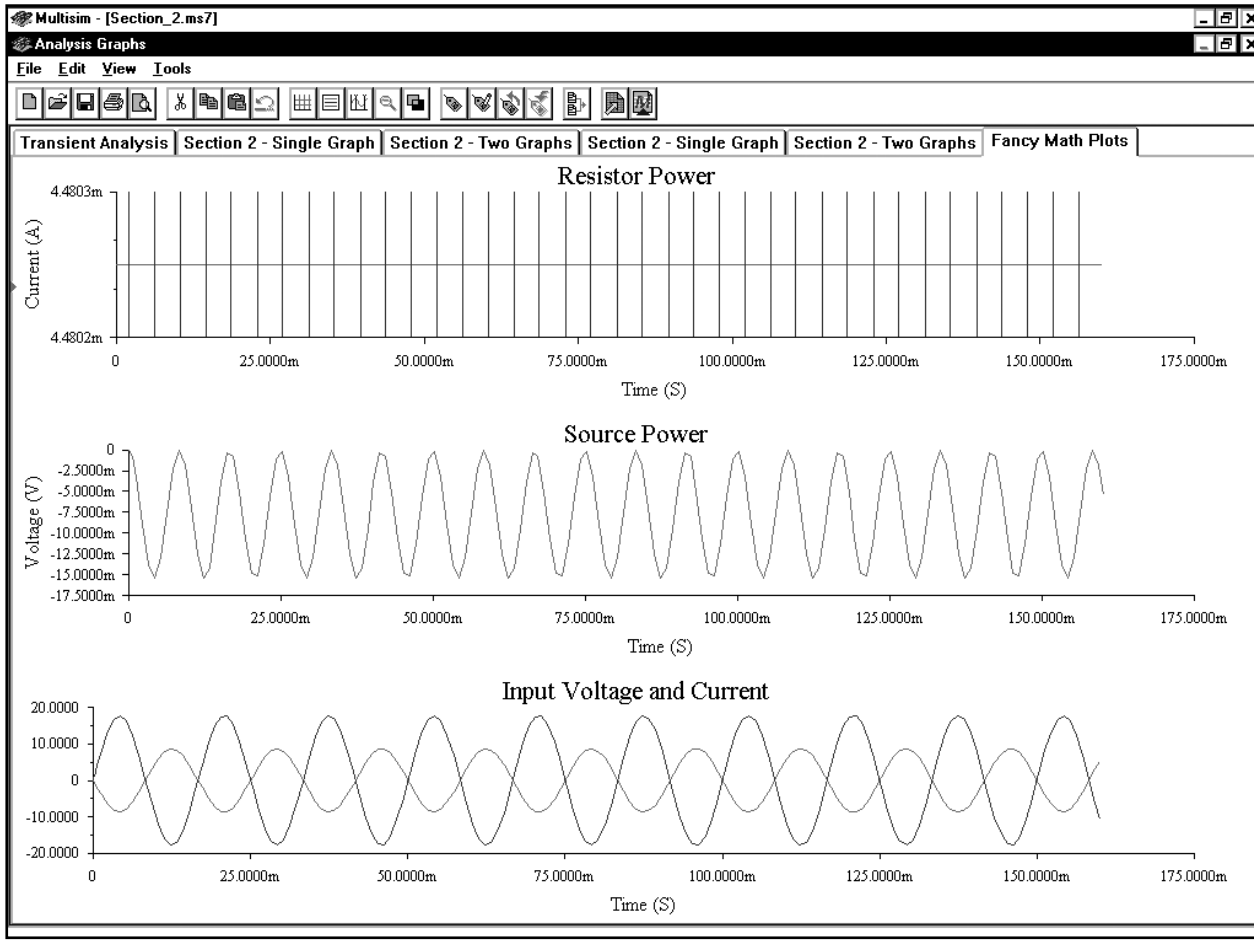
Наконец, добавим две кривые в график **Resistor Power**. Выберем этот график:



Мы хотим отобразить на графике среднее и мгновенное значения мощности, которая рассеивается резистором Rx. Добавим эти два выражения, как показано ниже:

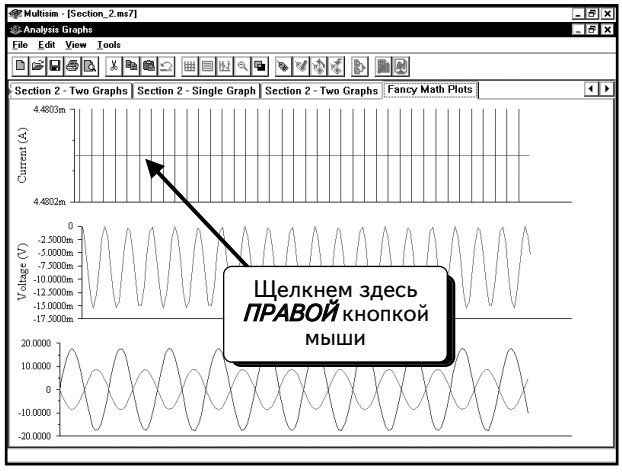


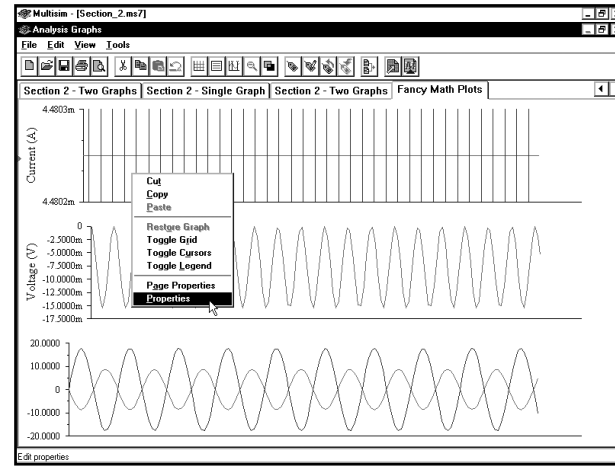
Были выбраны все графики. Теперь нажмем кнопку **Calculate**, чтобы вывести их:



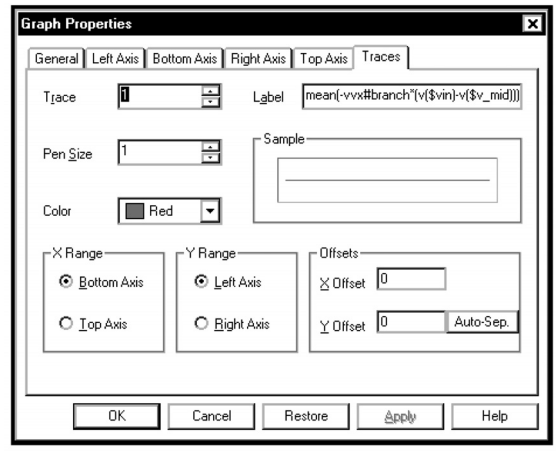
Если вы работаете в среде Windows с разрешением экрана 800x600 пикселей или меньше, то не увидите заголовки ***Resistor Power, Source Power*** и ***Input Voltage and Current*** из-за недостатка свободного пространства на странице. Обратите внимание: при нажатии кнопки **Calculate** в окно Grapher добавляются три графика. Следует удалить вкладки-копии.

Замечу, что верхний график имеет неправильный масштаб по оси y, поэтому он выглядит как набор вертикальных линий. Чтобы исправить это, щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по верхнему графику и выберем в контекстном меню пункт **Properties (Параметры)**:

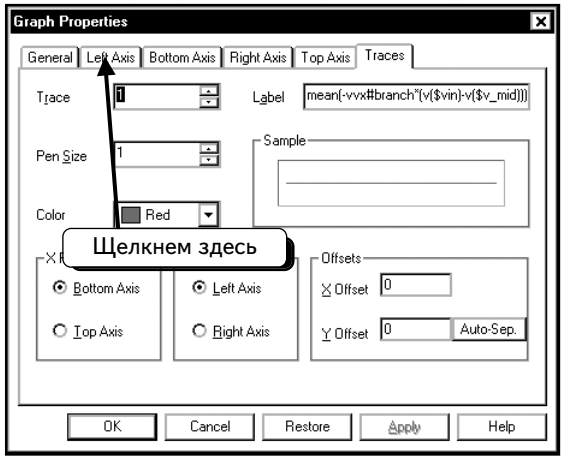


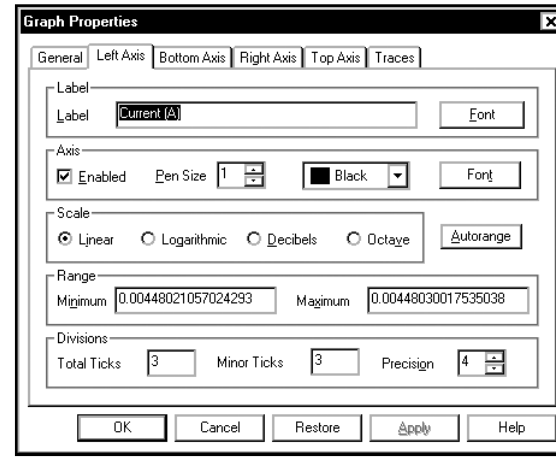


Появится диалоговое окно, в котором можно изменить параметры верхнего графика:

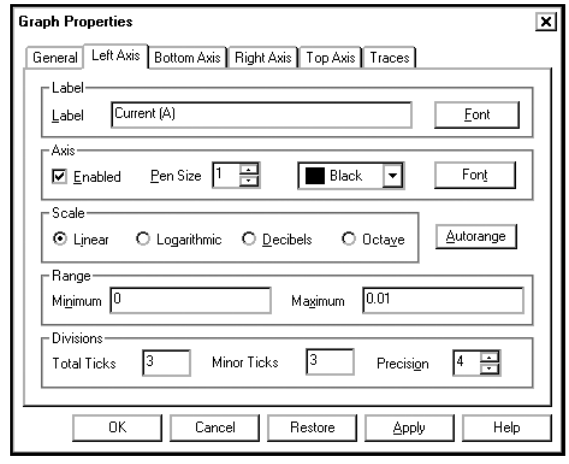


Щелкнем по вкладке **Left Axis (Левая ось)**:

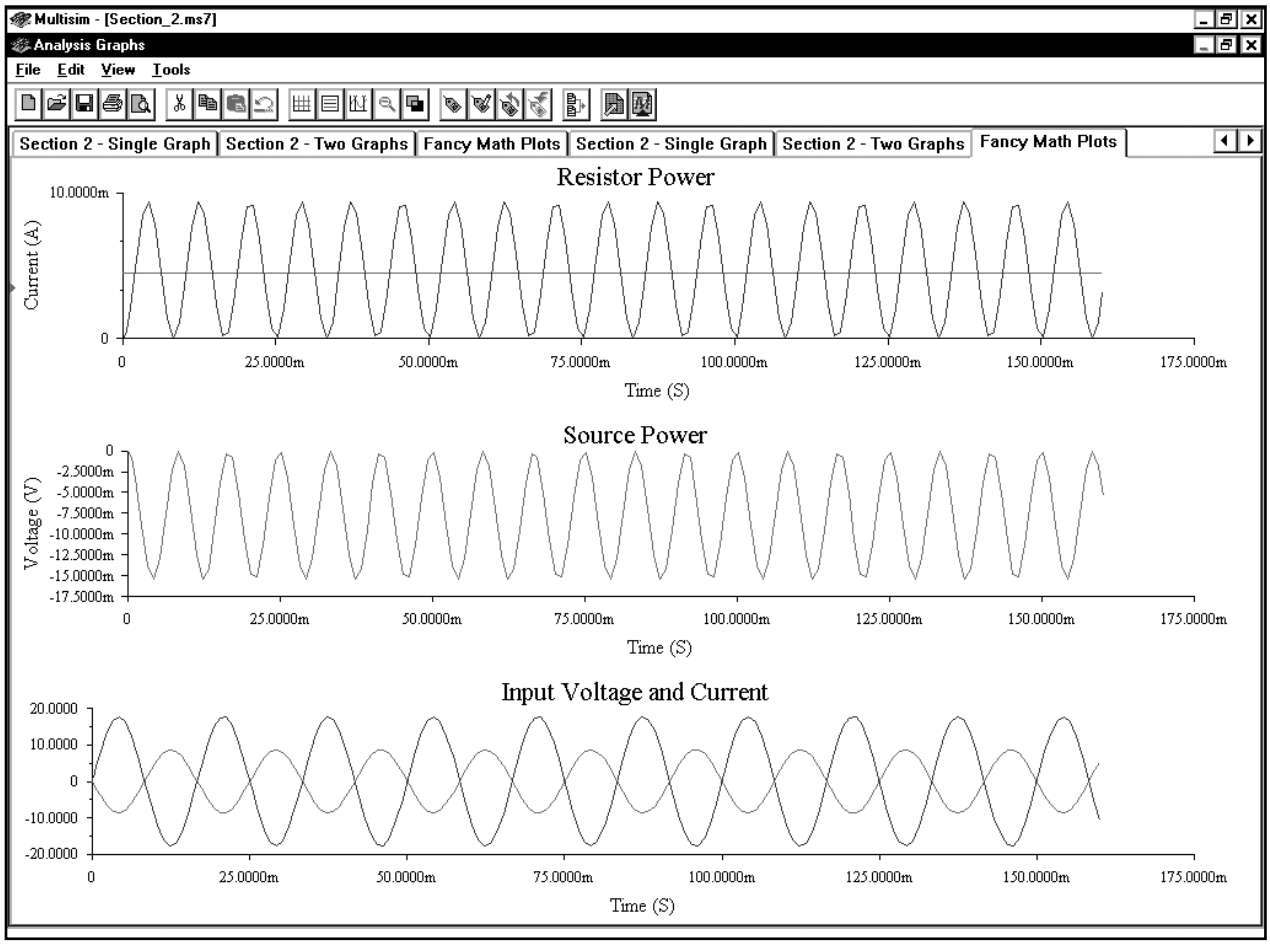




Установим нижнюю границу оси равной `0`, а верхнюю границу равной `0.01`. Таким образом, заданы границы для оси верхнего графика:



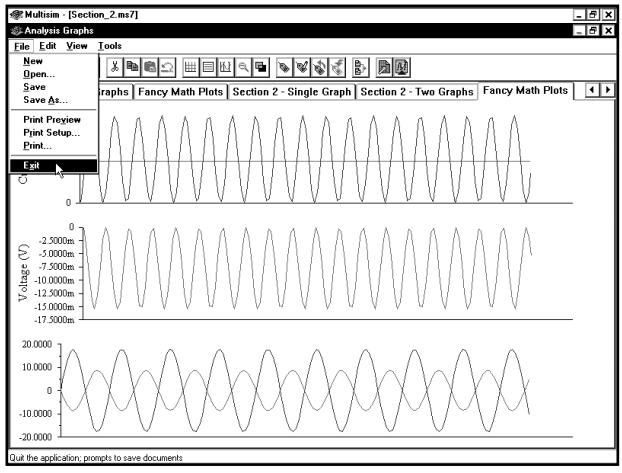
Нажмем кнопку **OK**, чтобы применить изменения:

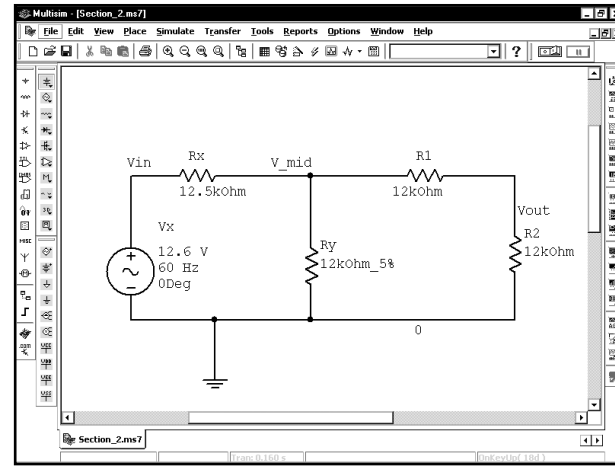


Перед тем как выйти из программы Multisim, советую вам прочитать следующий раздел, так как он посвящен сохранению и загрузке страниц. После этого можно вернуться к этому разделу, чтобы завершить анализ.

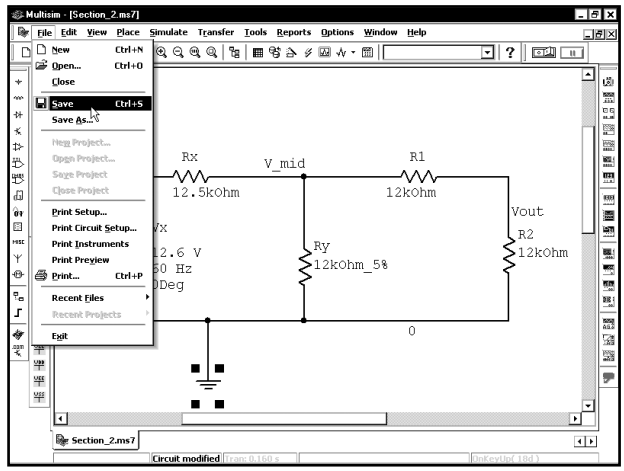
2.4. Сохранение и загрузка страниц

Было потрачено много времени на создание и настройку страниц и графиков в программе Postprocessor. Теперь сохраним параметры системы, чтобы упростить создание страниц и графиков при дальнейшей работе со схемой. Параметры Postprocessor автоматически сохраняются при сохранении схемы. Таким образом, перед выходом необходимо сохранить схему. Сначала выйдем из программы Grapher. Для этого выберем в меню пункты **File** ⇒ **Exit**:



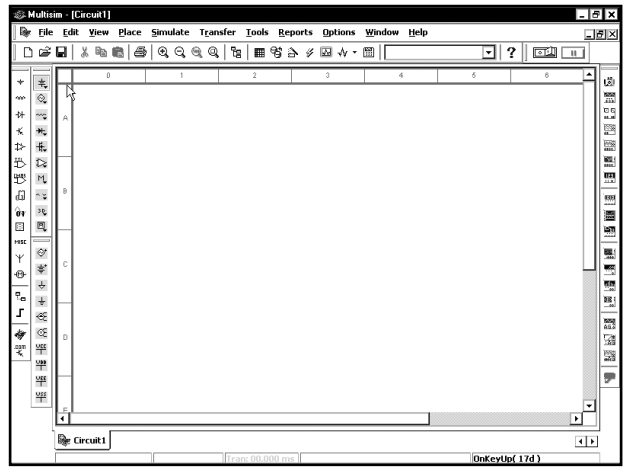


Теперь сохраним схему: выберем в меню пункты **File ⇒ Save (Файл ⇒ Сохранить)**:

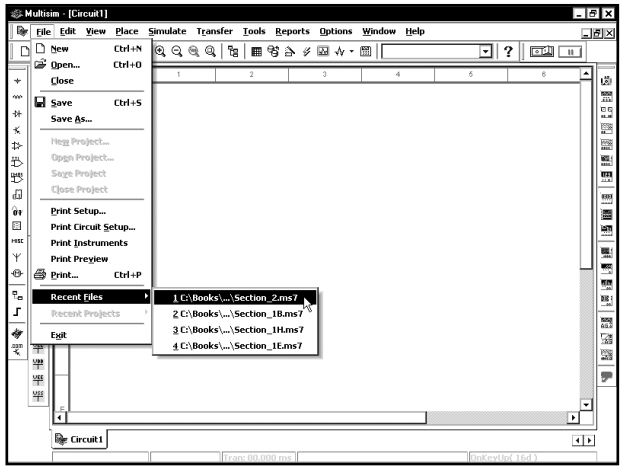


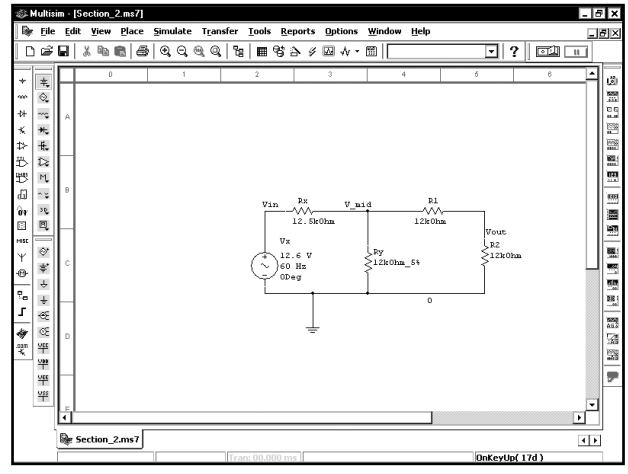
Если вы сохраняете схему впервые, то необходимо ввести ее название.

Мы сохранили страницы Postprocessor и схему, и теперь можно выйти из программы Multisim. Впоследствии можно быстро загрузить результаты моделирования. Выберем пункты меню **File ⇒ Exit**, чтобы закрыть программу Multisim 7. Рассмотрим теперь, как загружать сохраненные графики. Откроем программу Multisim 7. На экране появится пустое окно для работы со схемами:

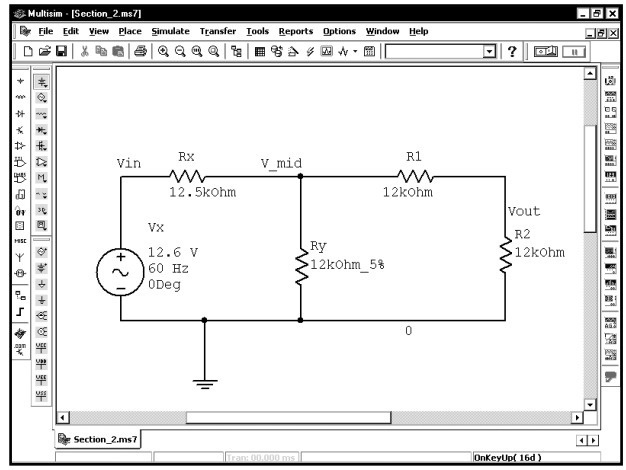


Сначала необходимо открыть файл схемы. Выберем пункты меню **File ⇒ Recent Files (Файл ⇒ Недавно использовавшиеся файлы)**, затем нужный файл. В данном примере используем название **Section_2.ms7**:

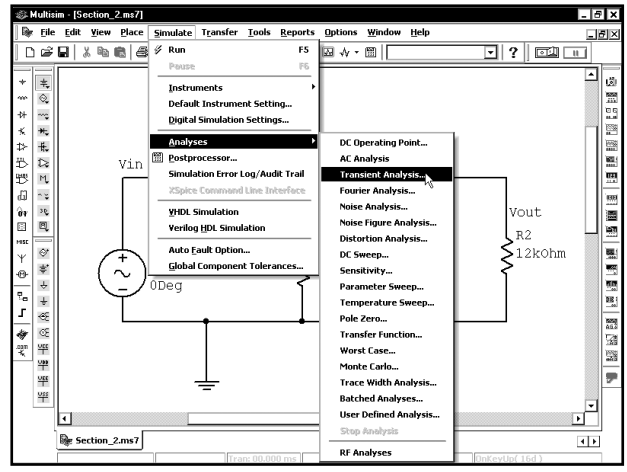




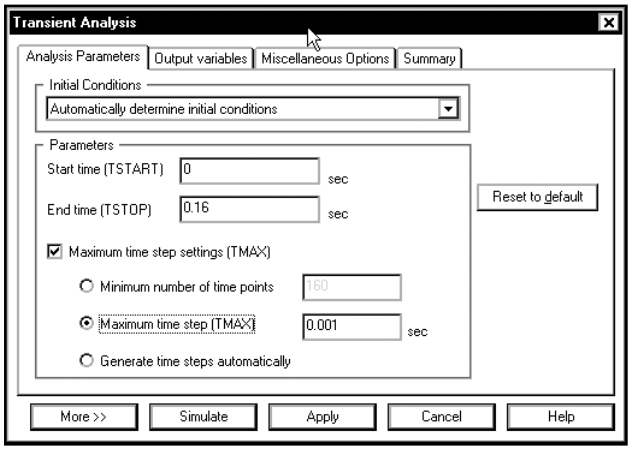
При желании можно увеличить окно и центрировать схему:

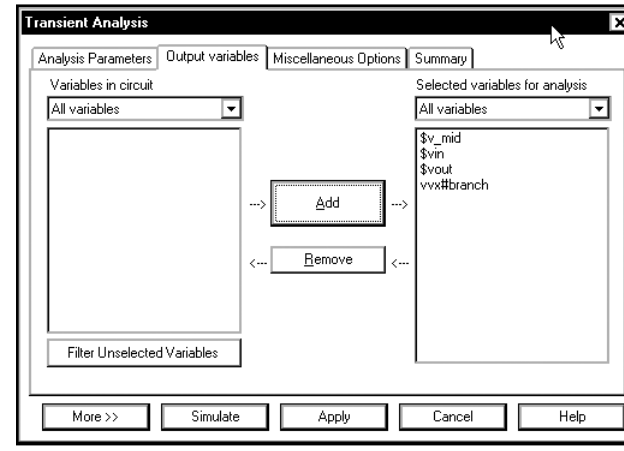


Теперь необходимо повторно выполнить моделирование, чтобы создать данные для схемы. Повторим моделирование, которое мы выполняли ранее. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **Transient Analysis**.

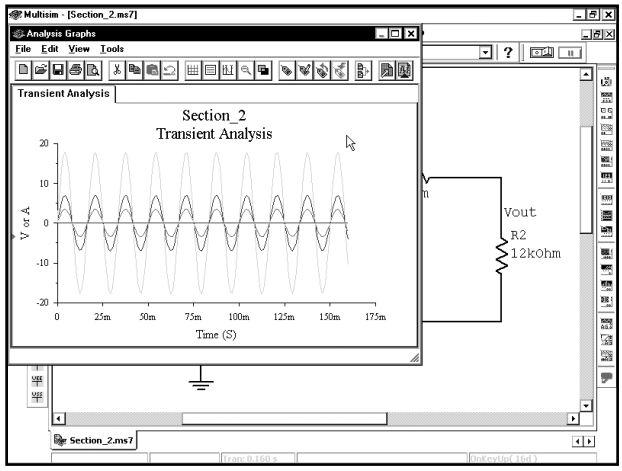


Следует проверить, совпадают ли вкладки ***Analysis Parameters*** **(Параметры анализа)** и ***Output variables*** **(Переменные выхода)** с теми вкладками, которые были сохранены. Они должны совпадать, так как информация сохранялась вместе со схемой. Но проверка никогда не бывает лишней:

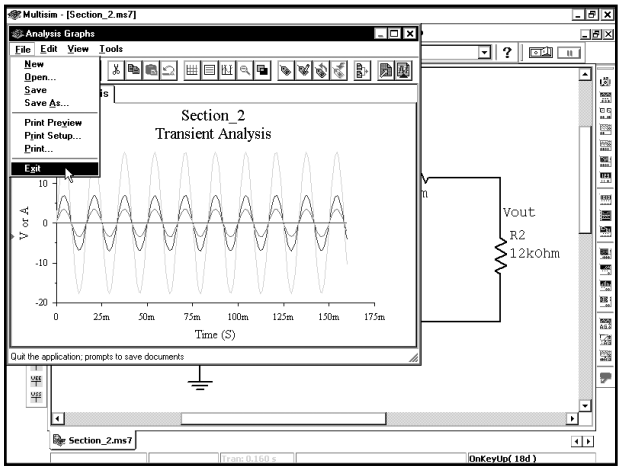


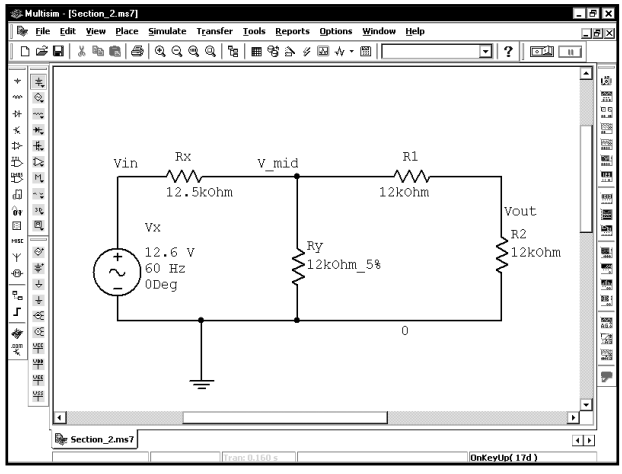


Вкладки идентичны, поэтому нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:

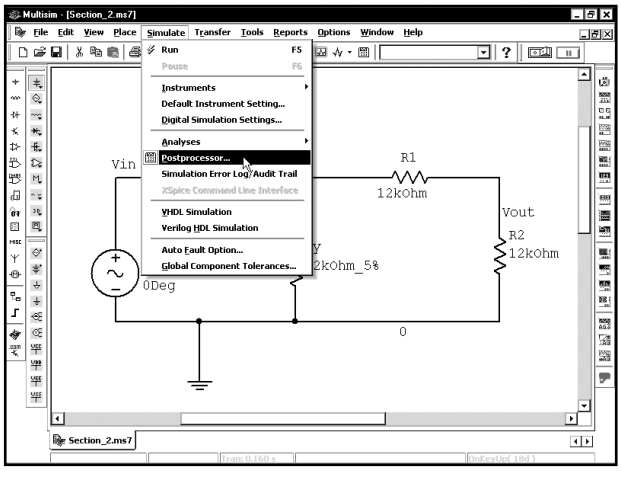


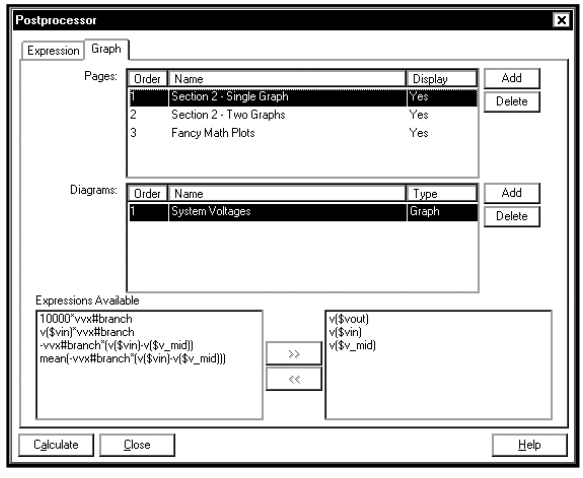
Откроем программу Postprocessor, чтобы «рассчитать» созданные ранее страницы. Сначала выберем пункты **File ⇒ Exit**, чтобы закрыть окно Grapher:



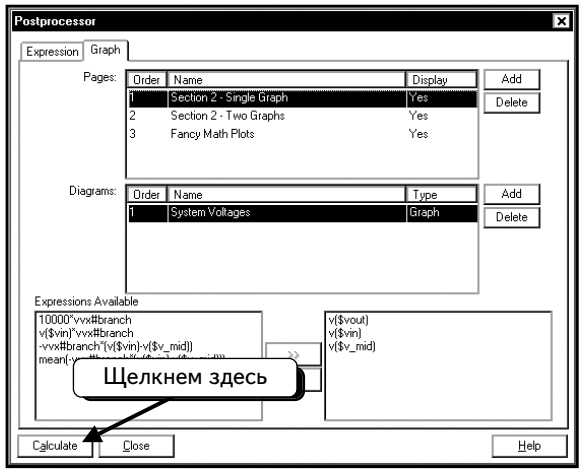


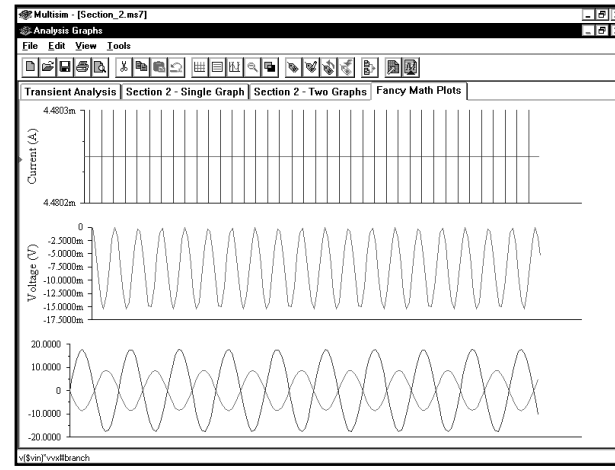
Далее выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Postprocessor**, чтобы открыть программу Postprocessor:



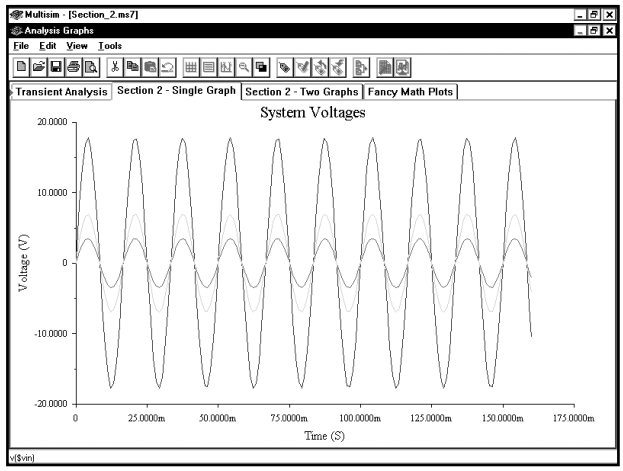


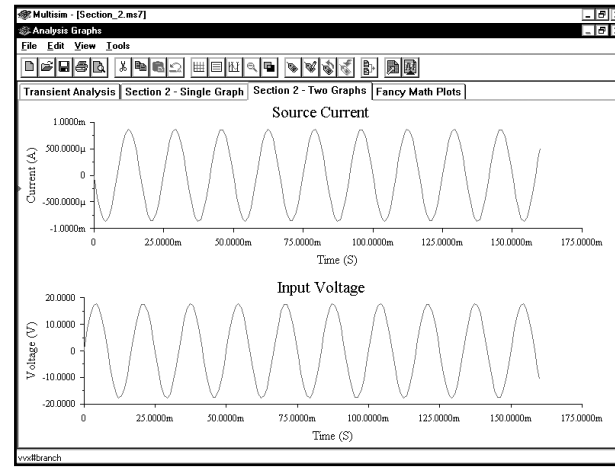
Обратите внимание: все страницы и графики, созданные в разделах 2.1—2.3, отображены в окне Postprocessor. Чтобы отобразить страницы и графики, нужно нажать кнопку **Calculate**:





Будут созданы все три страницы Postprocessor :



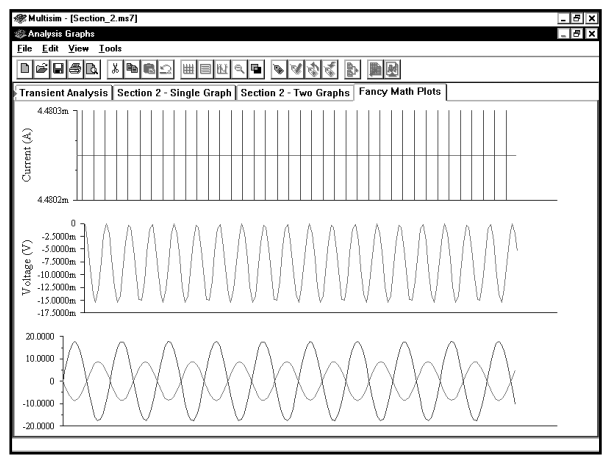


2.5. Удаление объектов в программе Postprocessor

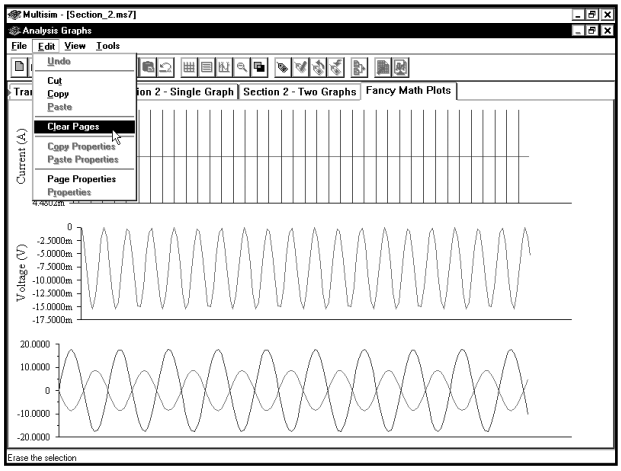
Мы рассказали о том, как создавать страницы, графики и кривые в программе Postprocessor. Теперь покажем, как можно их удалить.

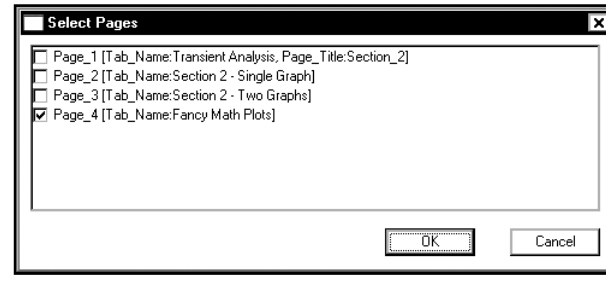
2.5.1. Удаление кривой из графика

Сначала удалим кривую из графика на одной странице, а именно — кривую тока из графика Input Voltage and Current на странице Fancy Math Plots. Перед этим очистим окно Grapher, чтобы избежать возможной путаницы. Если окно Postprocessor открыто, закроем его, если закрыто, откроем его (нажатием клавиш **CTRL+G**):

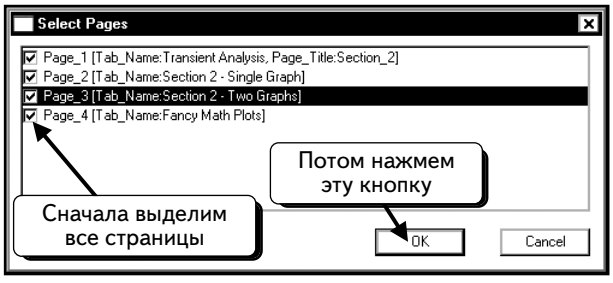


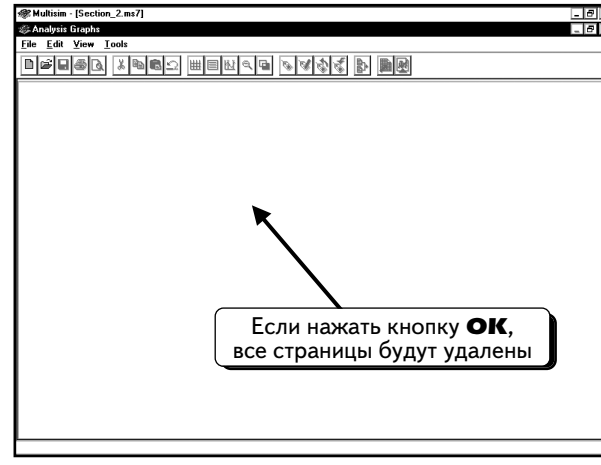
Мы хотим удалить все графики, поэтому выберем в меню пункты **Edit ⇒ Clear Pages (Правка ⇒ Очистить страницы)**:





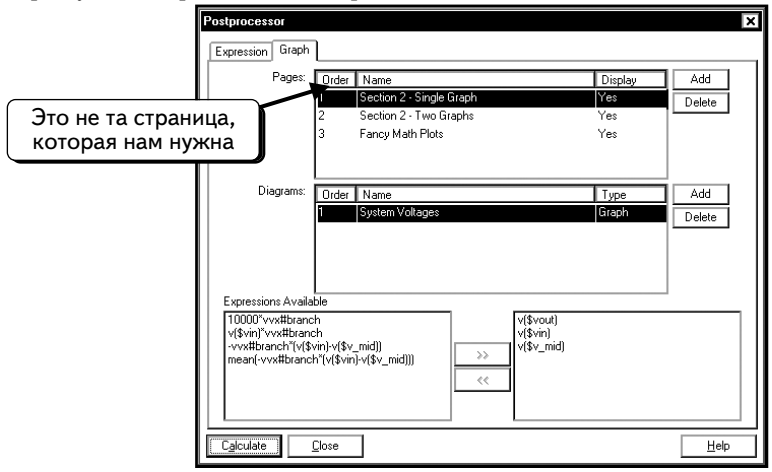
Удалим все страницы в окне Grapher: выделим их и нажмем кнопку **OK**:



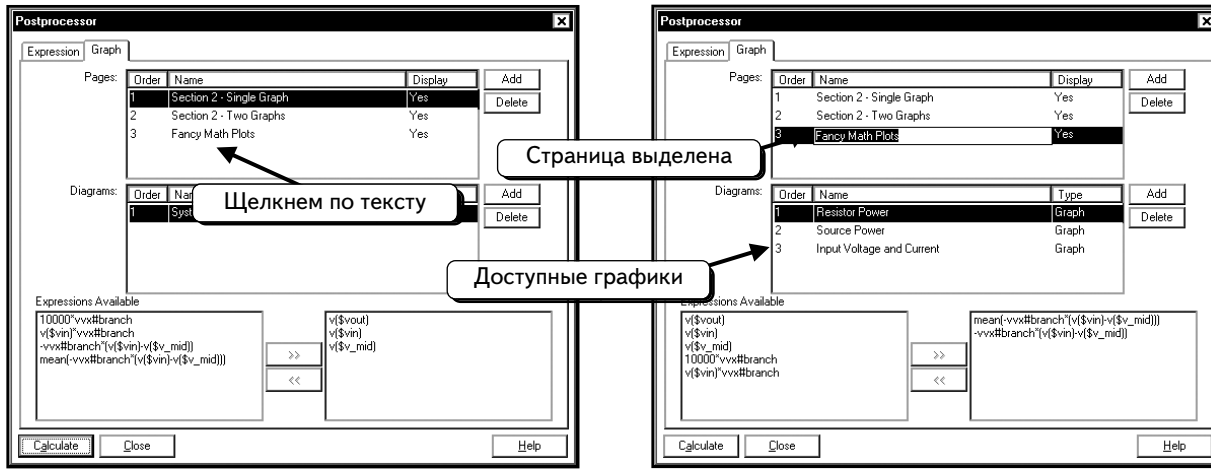


Теперь можно без труда идентифицировать новые кривые. Если бы не были очищены все страницы, пришлось бы работать и с устаревшими, и с новыми графиками. При этом было бы непросто определить, что есть что, и отследить изменения.

Откроем окно Postprocessor и выберем нужную страницу, график и кривую. Выберем пункты меню **File ⇒ Exit**, чтобы закрыть окно Grapher, и пункты меню **Simulate ⇒ Postprocessor**, чтобы открыть окно Postprocessor. В нашем примере нужная страница не отображена в окне :



Будем работать со страницей ***Fancy Math Plots***. Щелкнем по этой странице, чтобы выбрать ее:



Страница ***Fancy Math Plots*** выбрана. На ней имеются три графика. Будем редактировать график ***Input Voltage and Current***. Он пока не выбран. Щелкнем по графику, чтобы выбрать его:

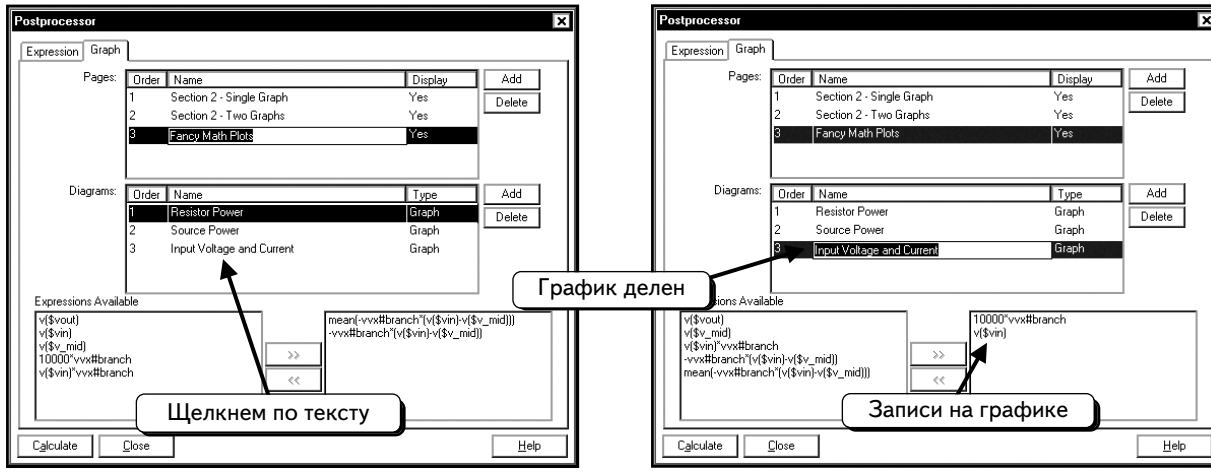
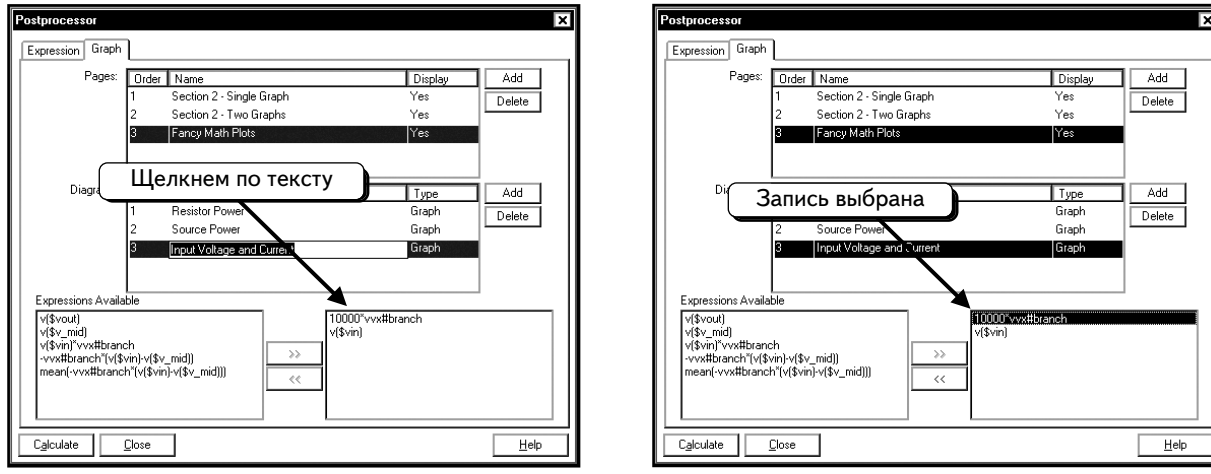
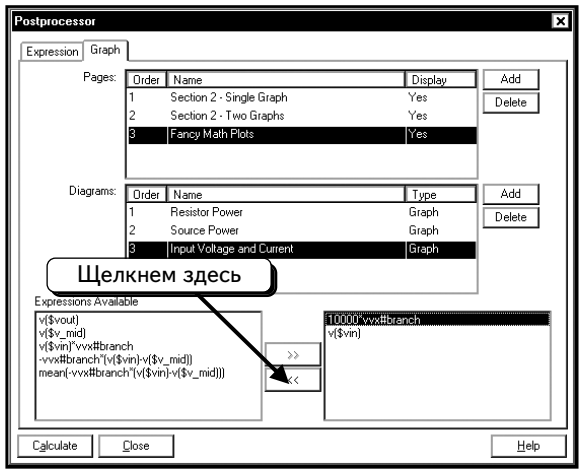
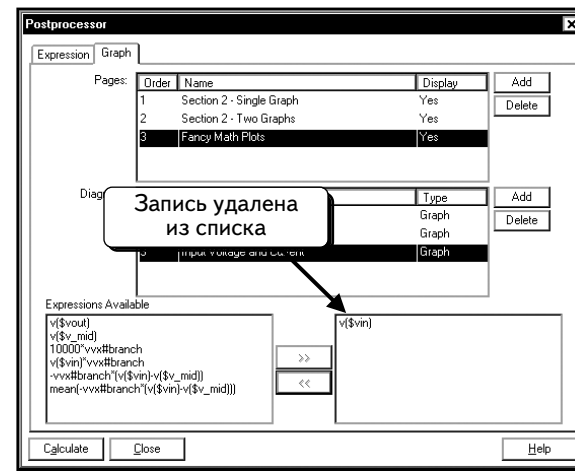


График включает две кривые. Чтобы удалить кривую тока, щелкнем по переменной ***10000*vvx#branch***:

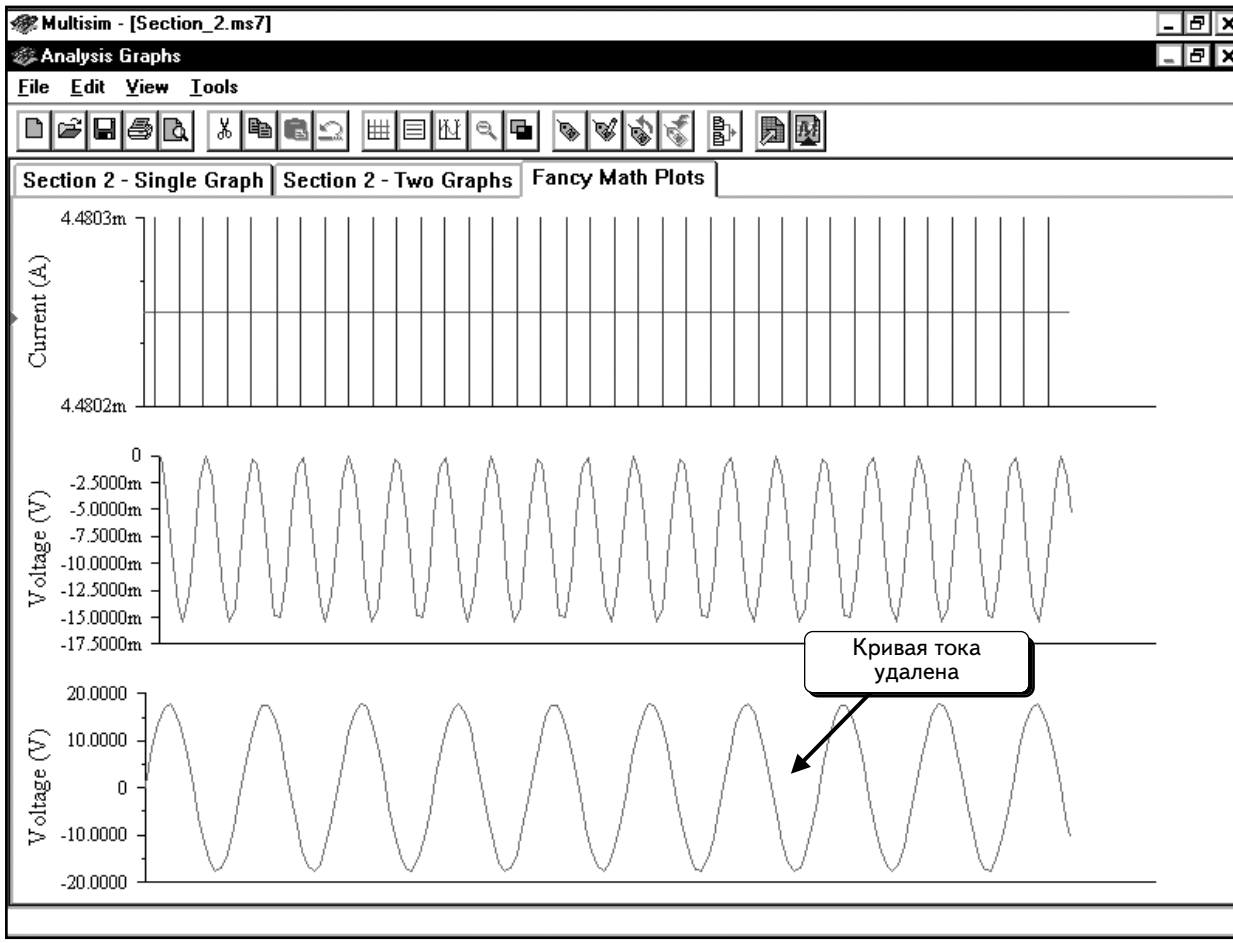


Чтобы удалить выделенную кривую, нажмем кнопку << :



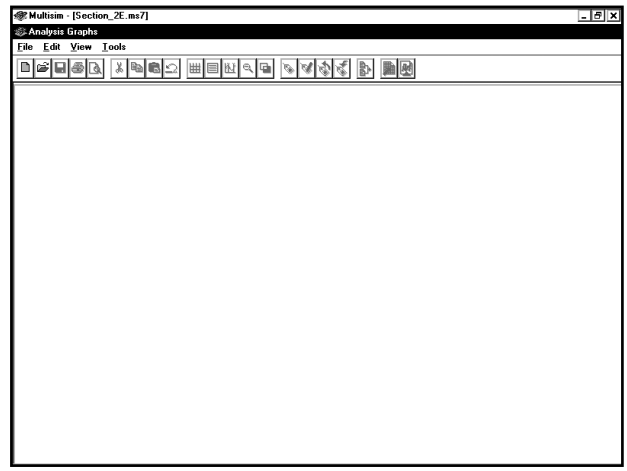


Кривая будет удалена из графика. Чтобы увидеть результат, нужно нажать кнопку **Calculate** и перерисовать все страницы Postprocessor. Некоторые существующие кривые будут скопированы; на новой странице **Fancy Math Plots** отобразятся внесенные изменения:

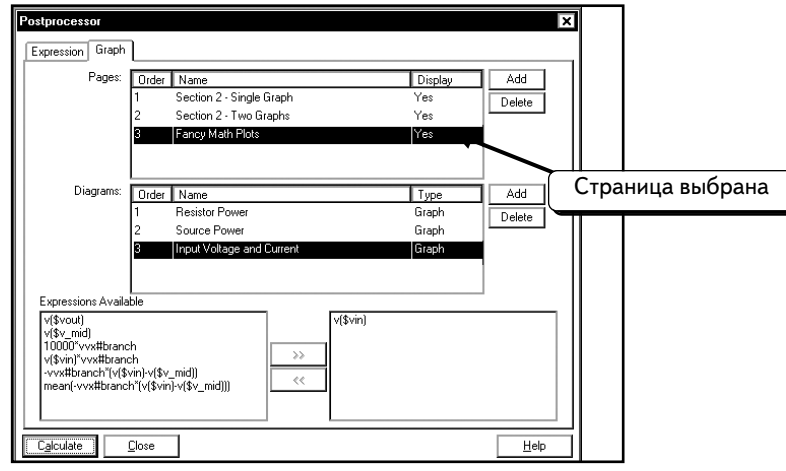


2.5.2. Удаление графика со страницы

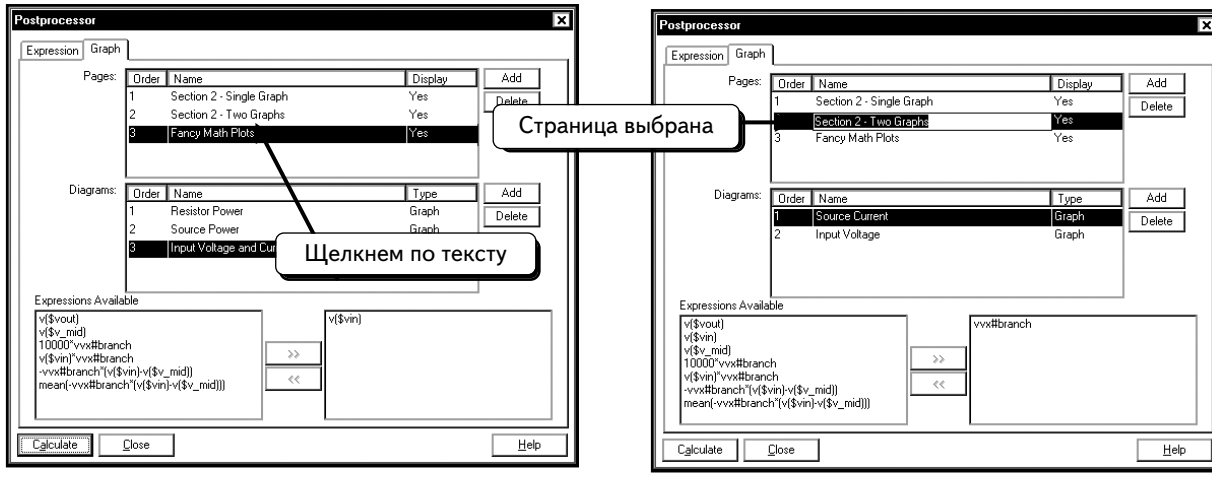
Удалим график со страницы. Сначала удалим все страницы из окна Grapher. Для этого воспользуемся процедурой, описанной в разделе 2.5.1 на с. 80—81:



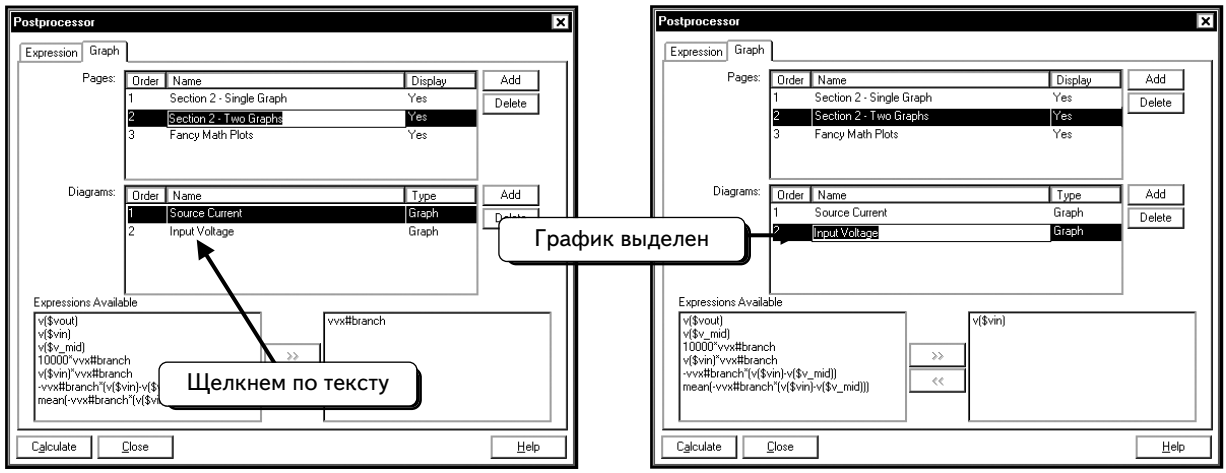
Мы хотим удалить график Input Voltage со страницы ***Section 2 — Two Graphs***. Для этого закроем окно Grapher и откроем окно Postprocessor:



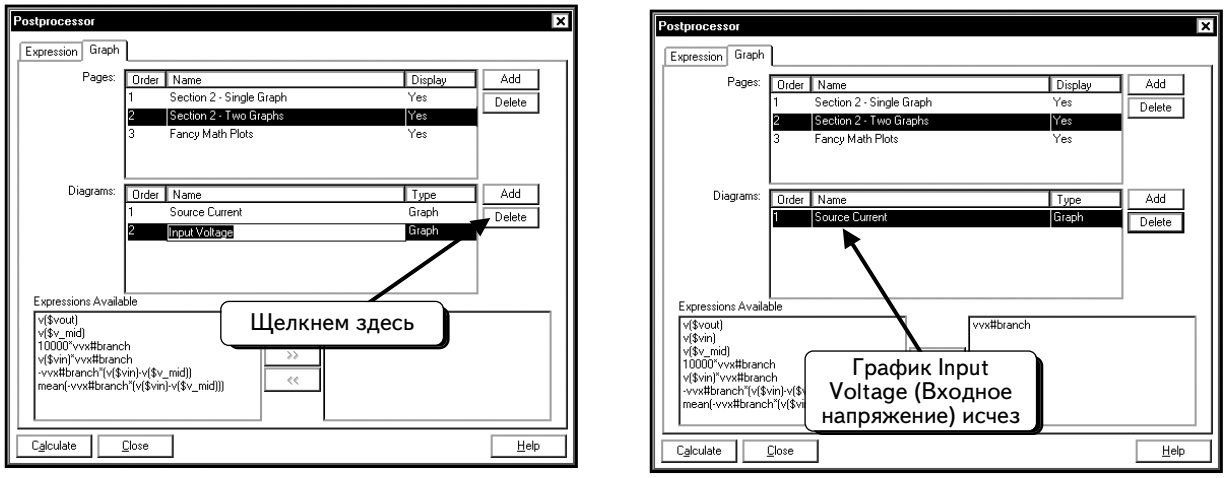
В окне Postprocessor по-прежнему выбрана страница ***Fancy Math Plots***. Будем работать со страницей ***Section 2 – Two Graphs***. Чтобы выделить эту страницу, щелкнем по ней:



Теперь необходимо выбрать график ***Input Voltage***. Щелкнем по нему:

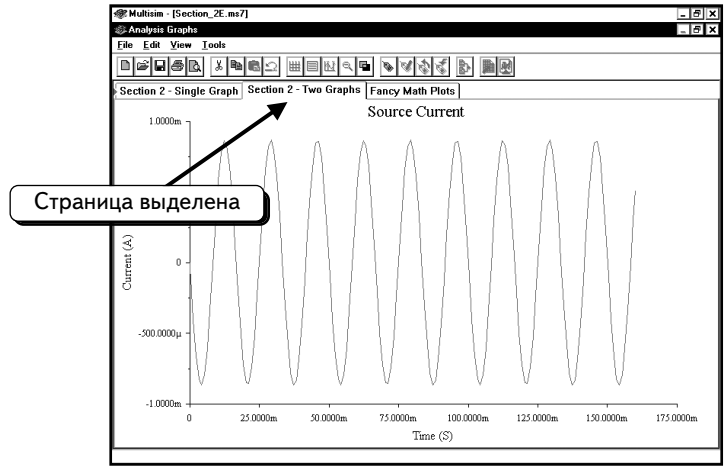


Был выбран график для удаления, и теперь нажмем кнопку ***Delete***:



Как видим, графика Input Voltage в списке больше нет. В окне Postprocessor остался только один график.

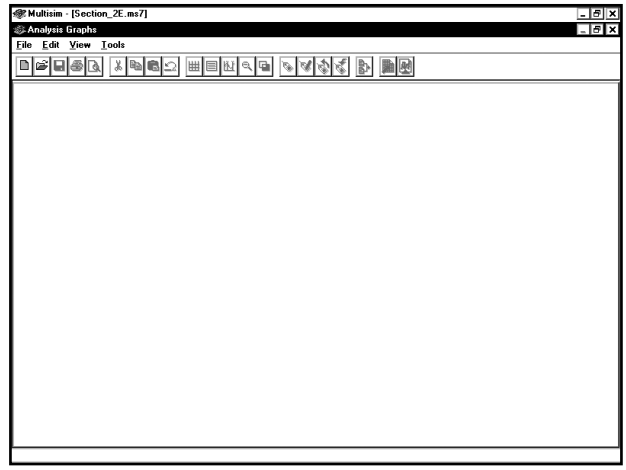
Чтобы просмотреть результаты изменений, нажмем кнопку ***Calculate***. Выберем страницу ***Section 2 — Two Graphs***:



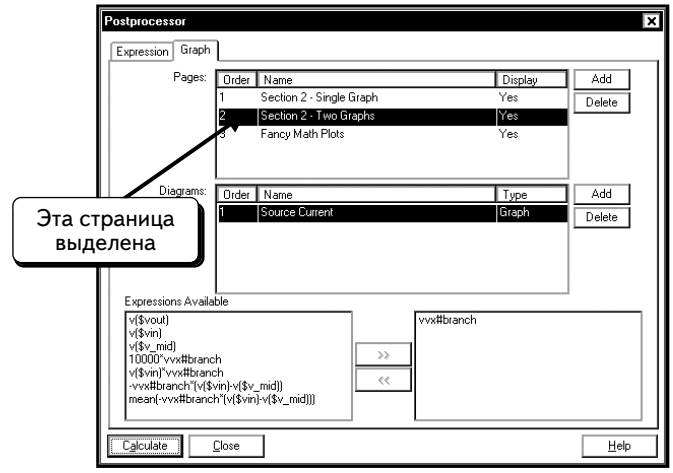
Теперь на странице остался только один график.

2.5.3. Удаление страницы

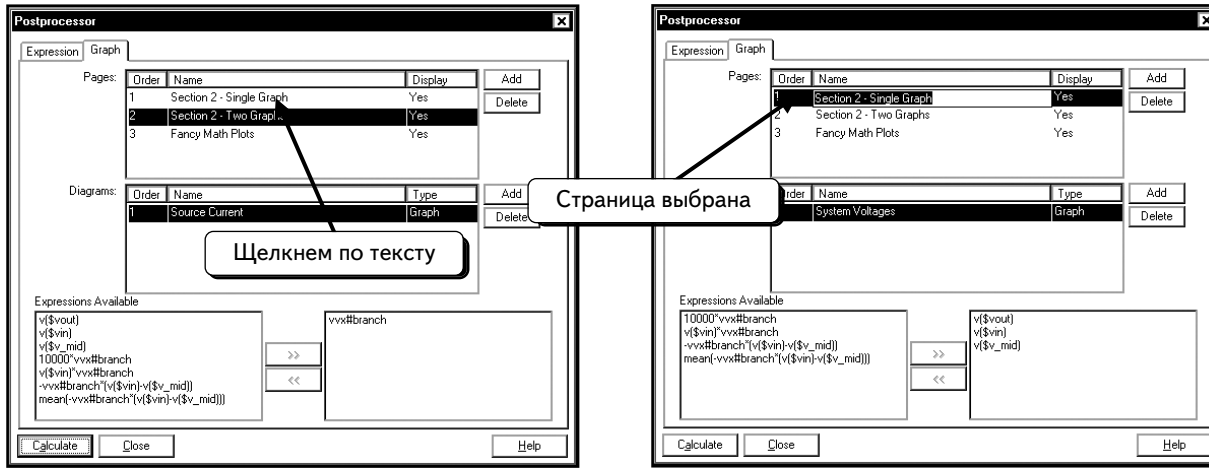
Теперь удалим всю страницу. Сначала удалим все страницы из окна Grapher, для чего воспользуемся процедурой, описанной в разделе 2.5.1 на стр. 80—81:



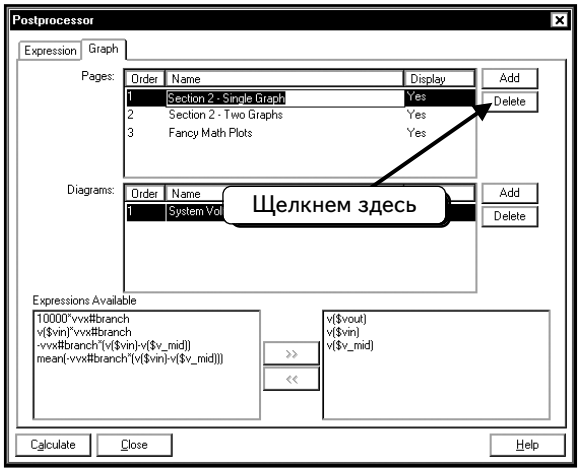
Закроем окно Grapher и откроем окно Postprocessor. Удалим страницу ***Section 2 — Single Graph***. Откроем программу Postprocessor. В нашем окне нужная страница отсутствует :

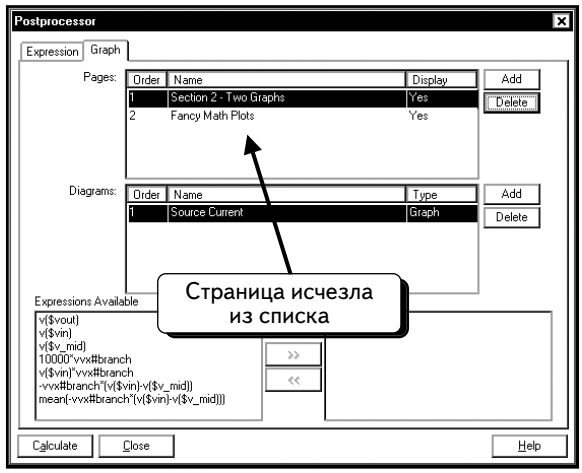


Чтобы выделить страницу ***Section 2 – Single Graph***, щелкнем по ней:



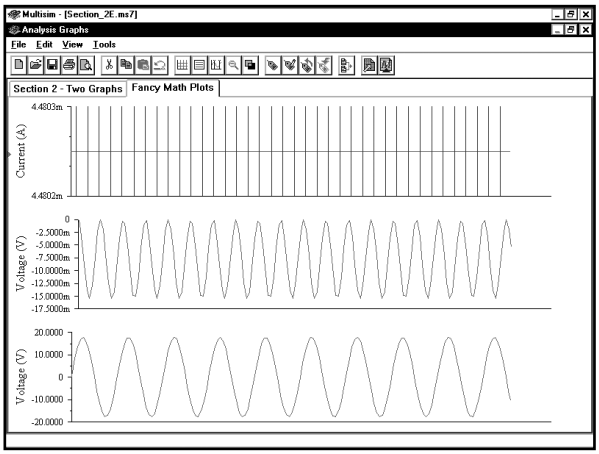
Нужная страница для удаления выбрана. Чтобы удалить ее, нажмем верхнюю кнопку ***Delete***:

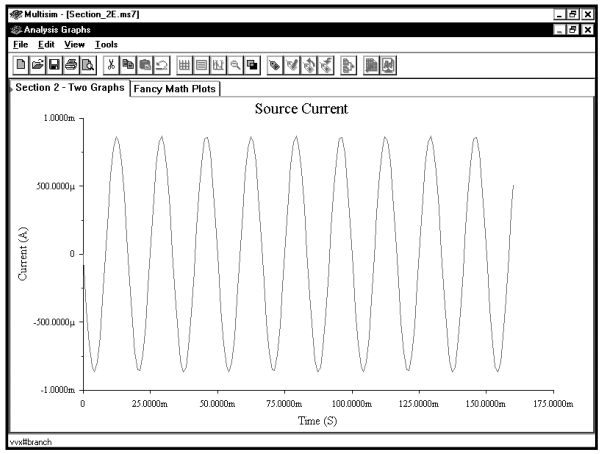




Страница будет удалена.

Чтобы просмотреть результаты изменений, нажмем кнопку **Calculate**. В окне Grapher остались только две вкладки для двух страниц. Обе страницы показаны ниже:

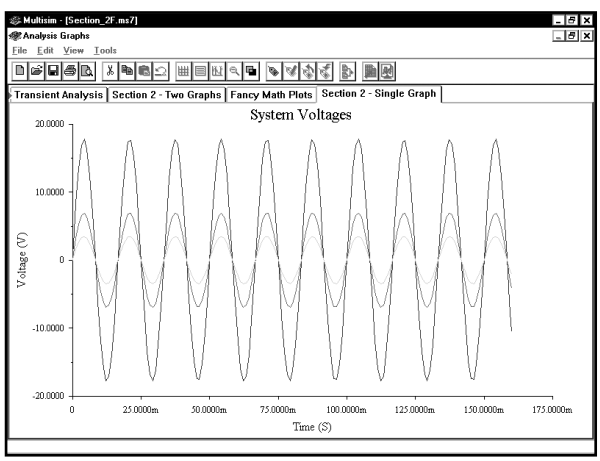




На левом рисунке отсутствуют заголовки графиков, т. к. было использовано разрешение 800x600. В предыдущих скриншотах применялось разрешение 1024x768, поэтому видны заголовки всех графиков.

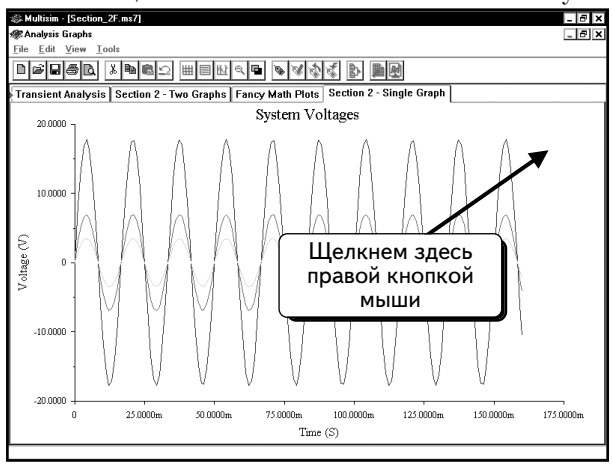
2.6. Изменение параметров графика в программе Grapher

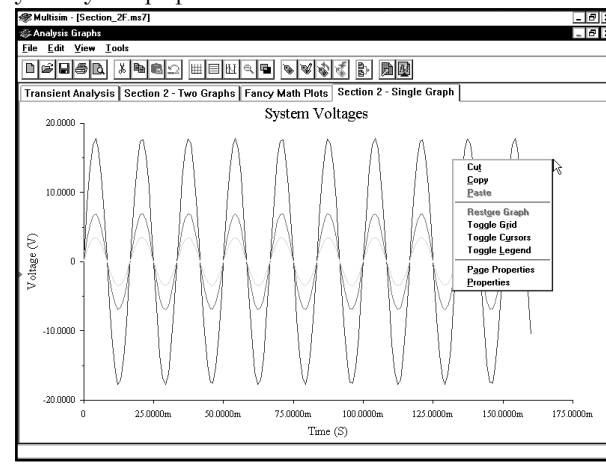
Окно Postprocessor позволяет создавать графики и добавлять в них кривые. Программа Grapher дает возможность редактирования графиков. Можно добавить сетку и легенду, изменить толщину кривой, отредактировать ярлыки и изменить масштаб. Продолжим работу со страницами, созданными ранее. Если нужные страницы уже закрыты, воспользуемся процедурой, описанной в разделе 2.5, чтобы восстановить графики. Откроем страницу Grapher с одним графиком:



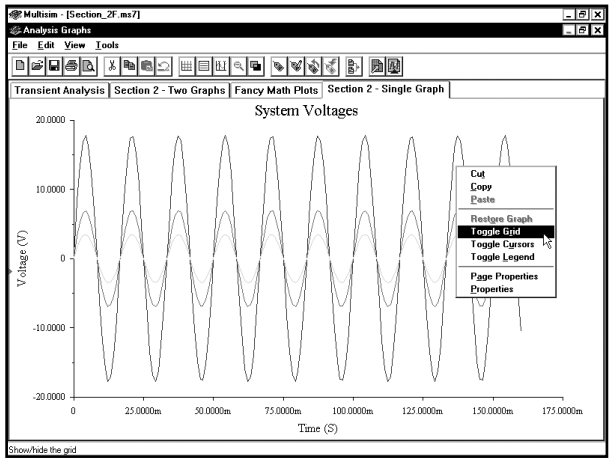
2.6.1. Добавление сетки и легенды

Существуют два способа добавления сетки и легенды в график. Расскажем о каждом из них. На странице, показанной выше щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на графике. Появится контекстное меню:



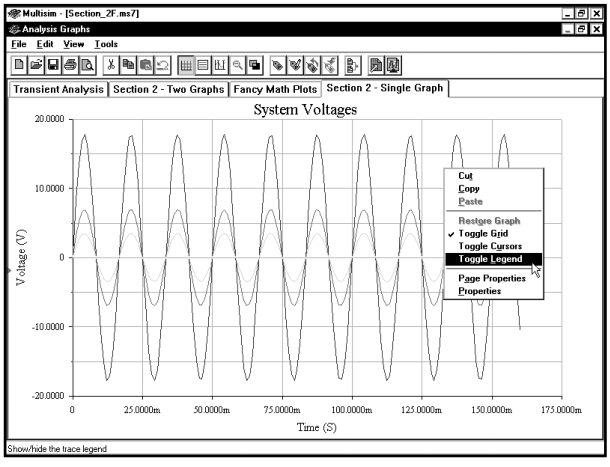


Чтобы добавить сетку, выберем в меню пункт **Toggle Grid (Добавить сетку)**:





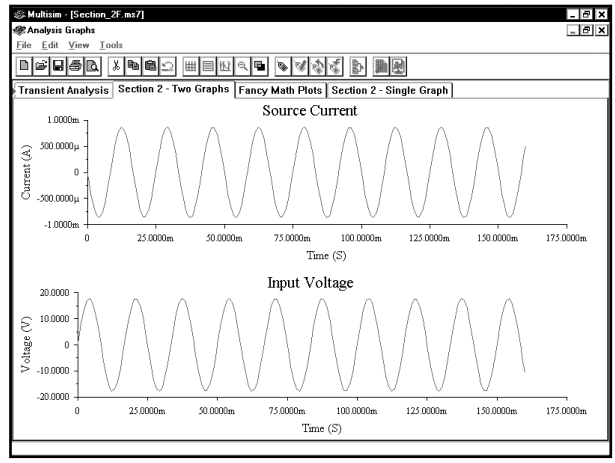
Чтобы отобразить легенду, выберем в контекстном меню пункт **Toggle Legend (Добавить легенду)**:





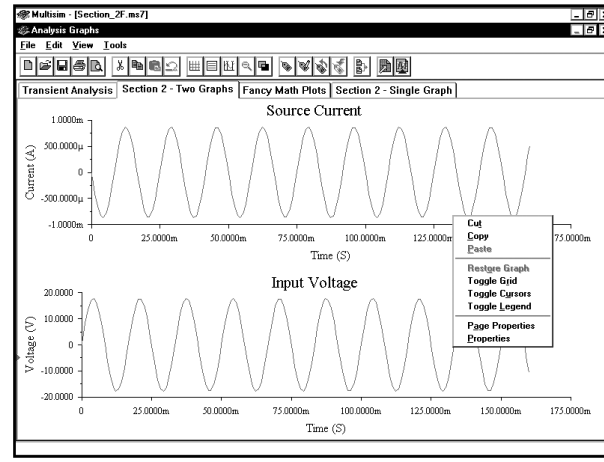
Если надо скрыть сетку или легенду, повторим действия, описанные выше.

Существует еще один способ, позволяющий отобразить или скрыть сетку и легенду. Откроем страницу с двумя графиками:

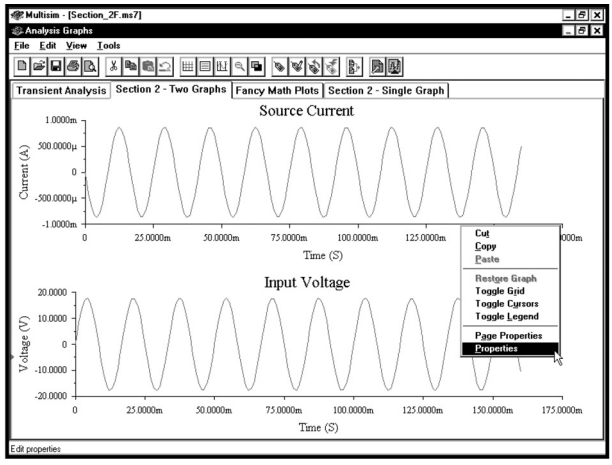


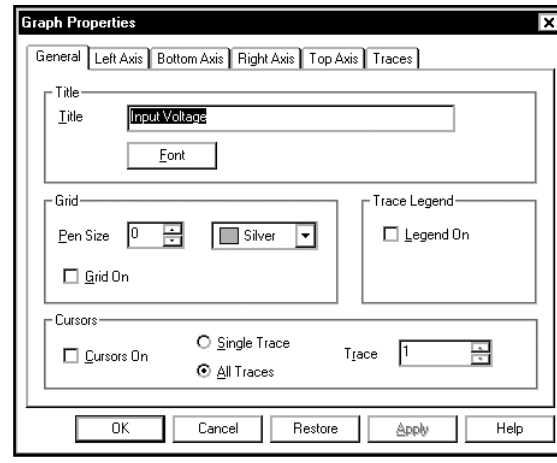
Каждый график редактируется отдельно. Изменим сетку и легенду для одного из них. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на нижнем графике. Появится меню:



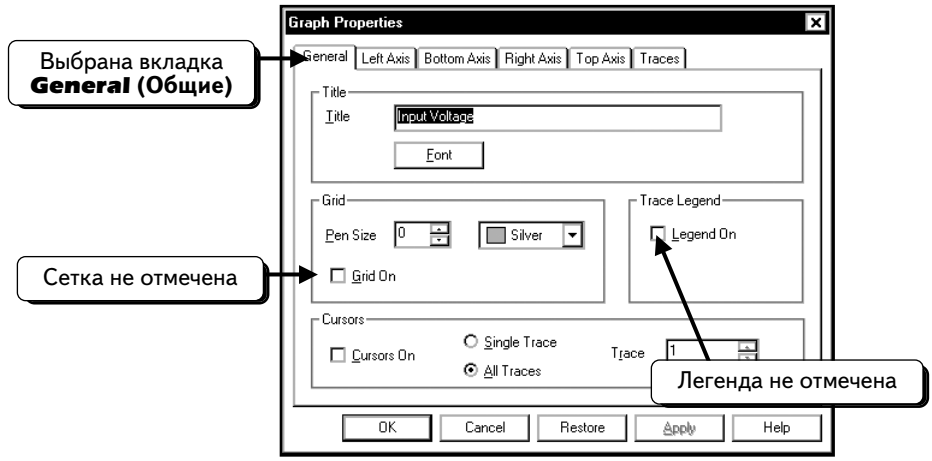


Выберем пункт **Properties (Параметры)**:

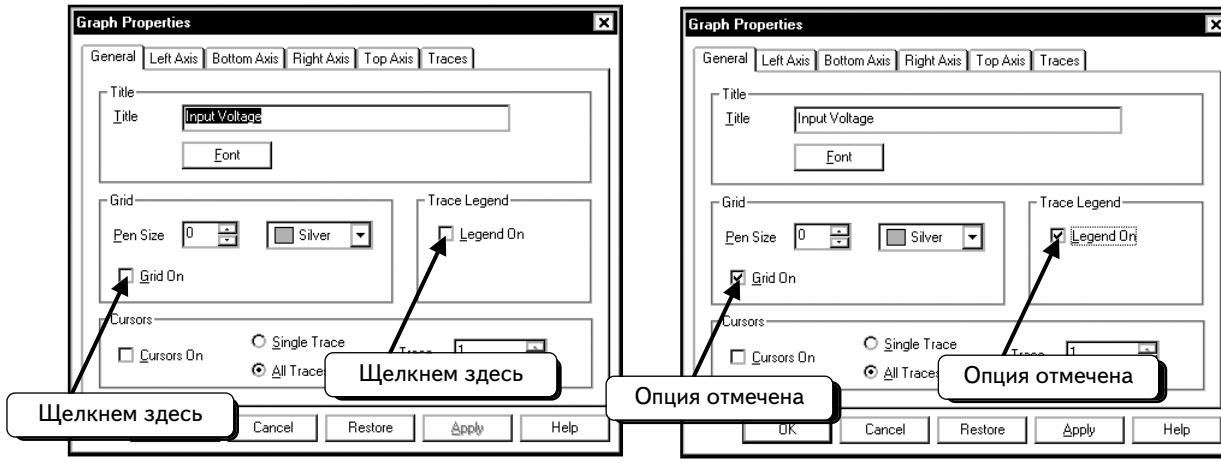




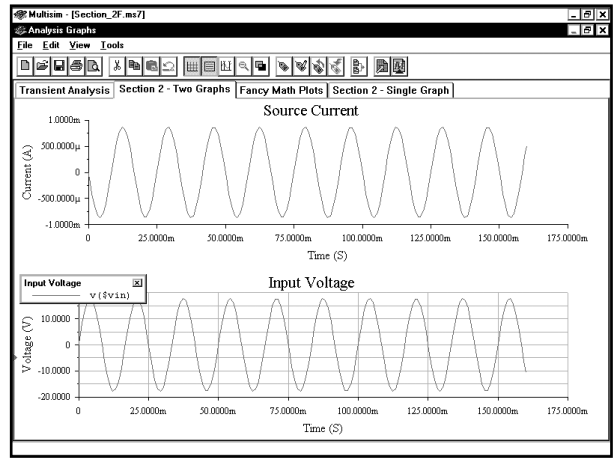
Данное диалоговое окно позволяет изменять все настройки графика. Отобразим сетку и легенду. В диалоговом окне выбрана вкладка **General (Общие)**. Если у вас выбрана другая вкладка, щелкнем по вкладке **General**. Обратим внимание на то, что в этой части диалогового окна можно изменять и сетку, и легенду (по умолчанию они скрыты):



Чтобы отобразить сетку и легенду, щелкнем по символу в виде квадрата ☐ рядом со списком опций. В поле появится галочка ☑ :



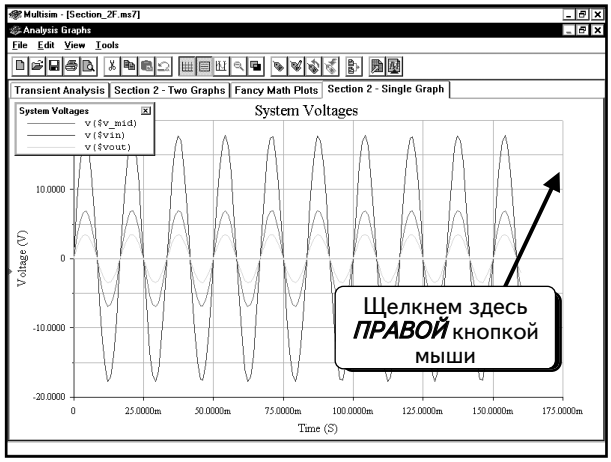
После нажатия кнопки **OK**, сетка и легенда отобразятся только на нижнем графике:

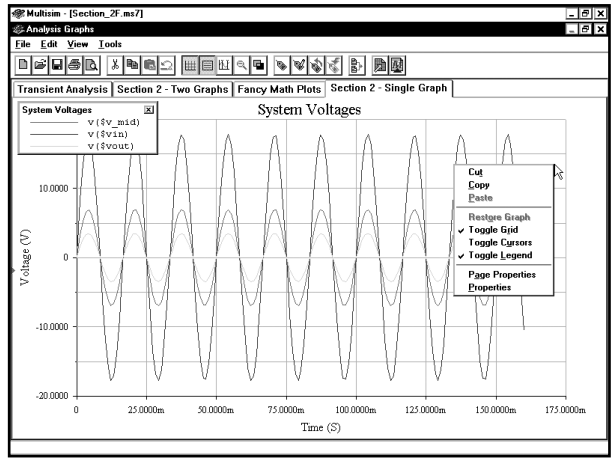


Чтобы отобразить сетку и легенду на верхнем графике, повторим действия, описанные выше. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на верхнем графике, чтобы открыть диалоговое окно настройки параметров.

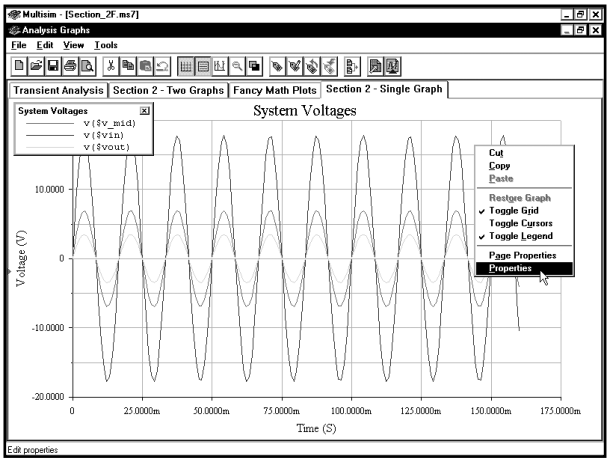
2.6.2. Толщина, цвет и ярлык кривой

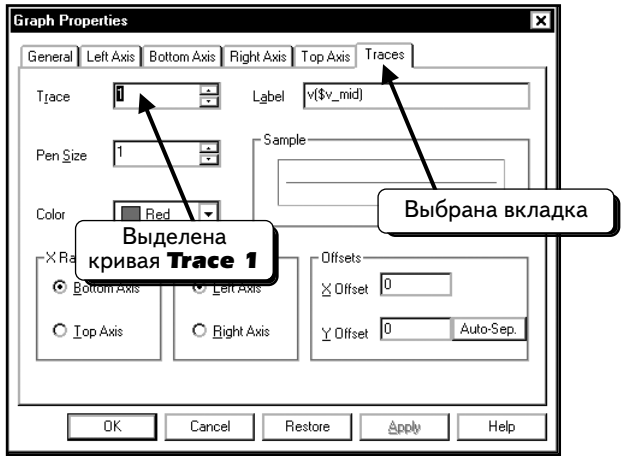
Поработаем со страницей, содержащей один график. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на графике. Появится меню:





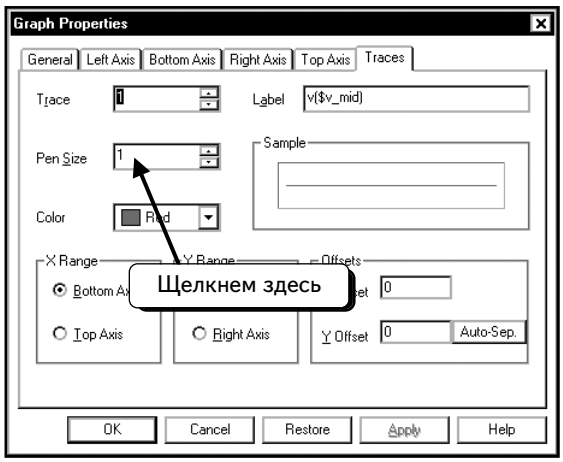
Выберем пункт **Properties**:

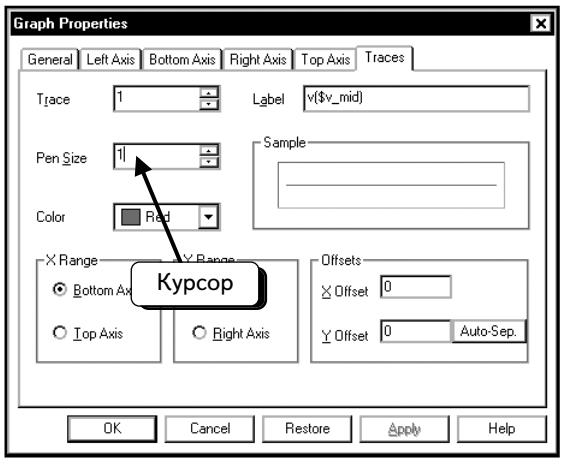




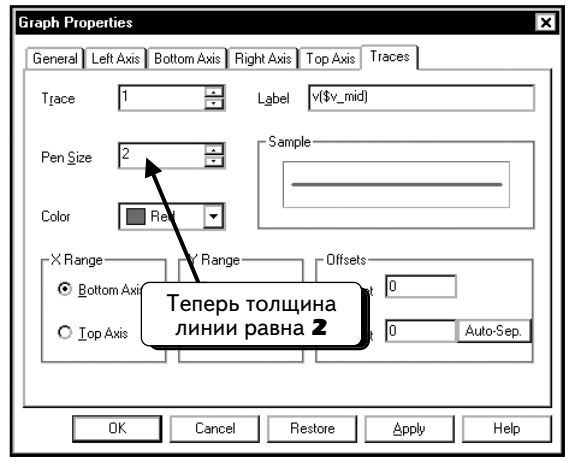
В диалоговом окне выбрана вкладка **Traces (Кривые)**. Будем работать с этой вкладкой. Если у вас выбрана другая вкладка, надо щелкнуть по вкладке **Traces**.

По умолчанию выделена кривая **Trace 1**, поэтому сначала модифицируем параметры данной кривой. Изменим толщину кривой. Щелкнем *ЛЕВОЙ* кнопкой мыши, чтобы поместить курсор в поле **Pen Size (Толщина кривой)**:

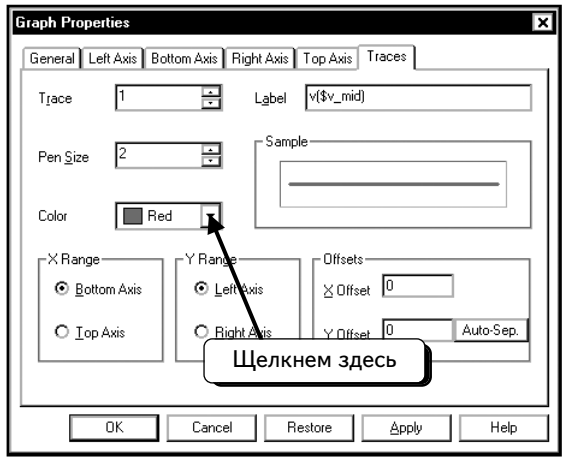


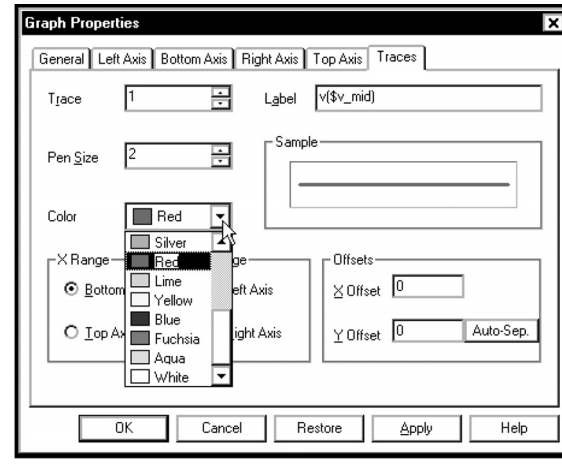


Можно пользоваться клавишами ([↑][↓]) , чтобы изменить значение. Мы хотим использовать для толщины значение « **2** », для чего один раз нажмем клавишу [↑] :

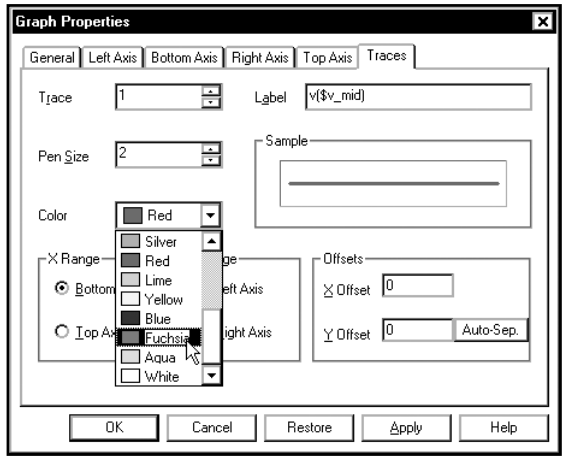


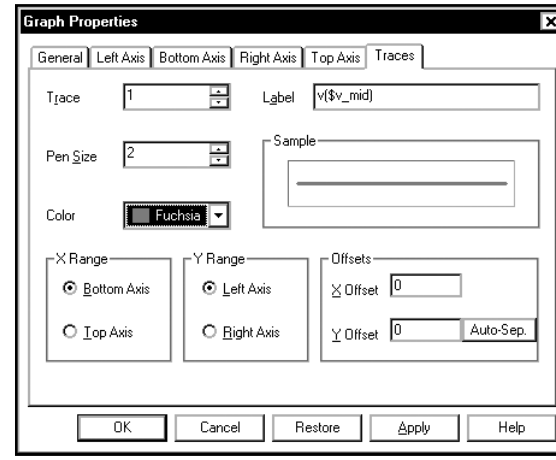
Теперь изменим цвет кривой. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по стрелке :



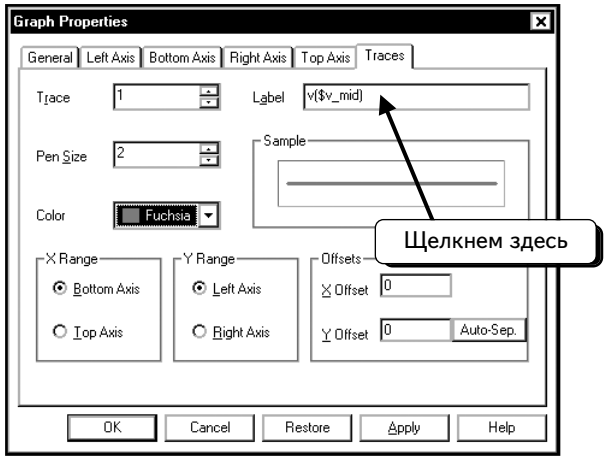


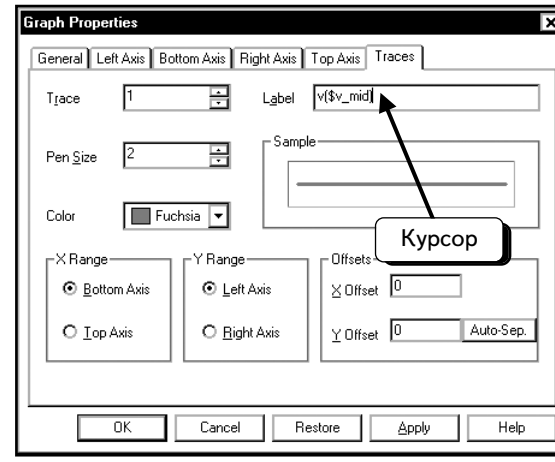
Выберем нужный цвет, например ***Fuchsia***:



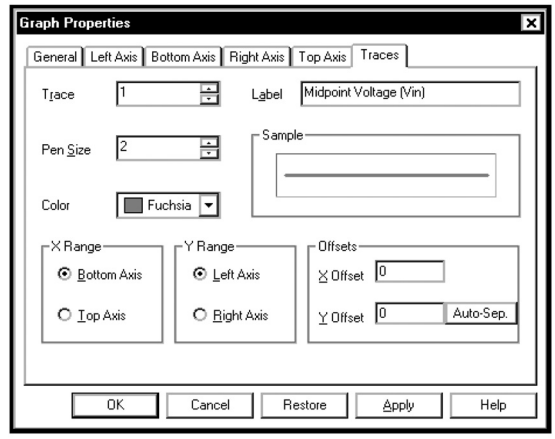


И наконец изменим ярлык кривой. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы поместить курсор в поле **Label (Ярлык)**:



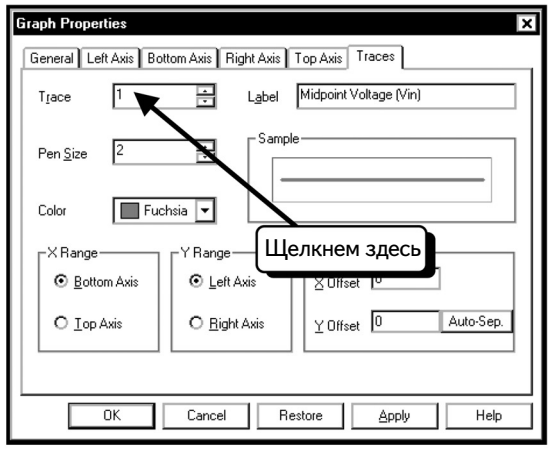


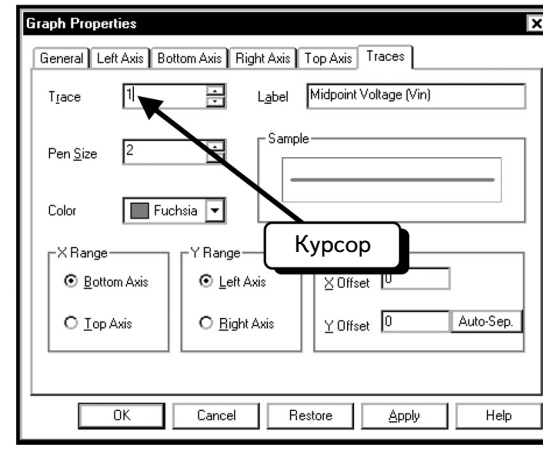
Теперь отредактируем текст ярлыка. С помощью клавиши **BACKSPACE** удалим существующий текст и введем новый — «**`Midpoint Voltage (Vin)`**»:



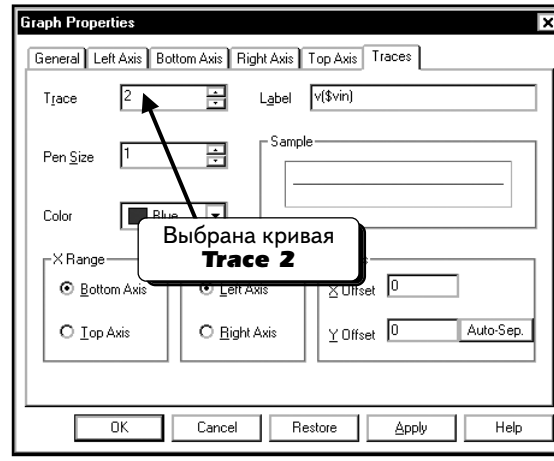
Редактирование кривой завершено.

График состоит из трех кривых, и можно изменить параметры каждой по отдельности. Сейчас выбрана кривая **Trace 1**. Чтобы выбрать другую кривую, щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши и поместим курсор в поле **Trace**:

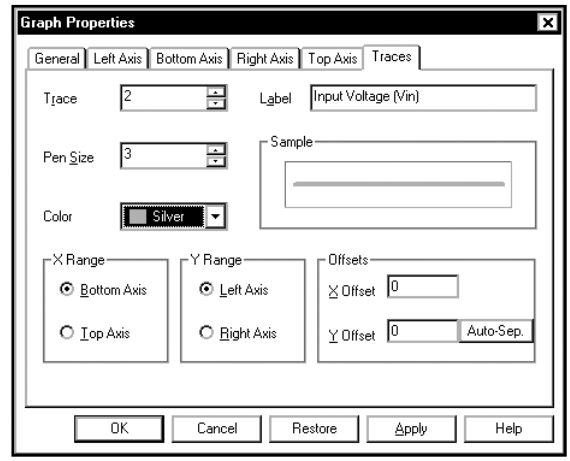




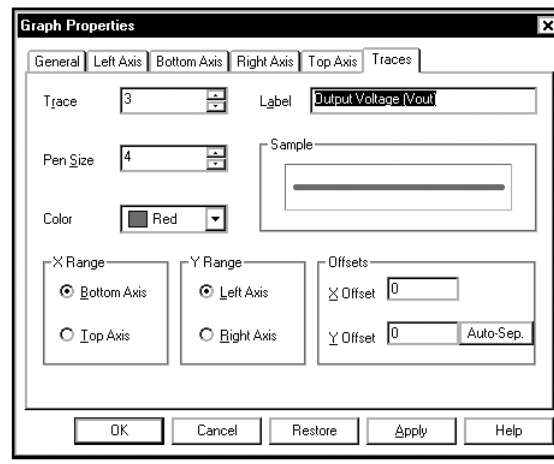
Можно пользоваться клавишами (↑ ↓), чтобы изменить значение. Мы хотим использовать значение « **2** », для этого один раз нажмем клавишу ↑ .



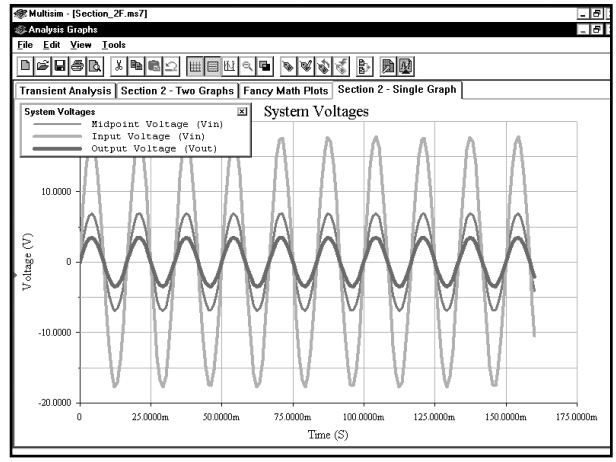
Сейчас мы работаем с кривой **Trace 2,** параметры которой отличаются от параметров кривой **Trace 1**. С помощью описанной выше методики изменим параметры этой кривой. Настроим **Pen Size** на 3, цвет — на **Silver**, а также изменим текст ярлыка на «`Input Voltage (Vin)`».



Далее изменим настройки кривой **Trace 3**. Для этого изменим **Pen Size** на 4, цвет — на **Red** и текст ярлыка на «`Output Voltage (Vout)`»:



Нажмем кнопку **OK**, чтобы вернуться в окно Grapher и просмотреть изменения:



Вы можете самостоятельно выбирать оптимальный цвет и толщину кривых для ваших графиков. На большинстве рисунков этой книги использовано значение 2 для параметра **Pen Size (Толщина кривой)**. Мы не можем изменить настройку Pen Size по умолчанию, поэтому придется вручную модифицировать каждый созданный график.

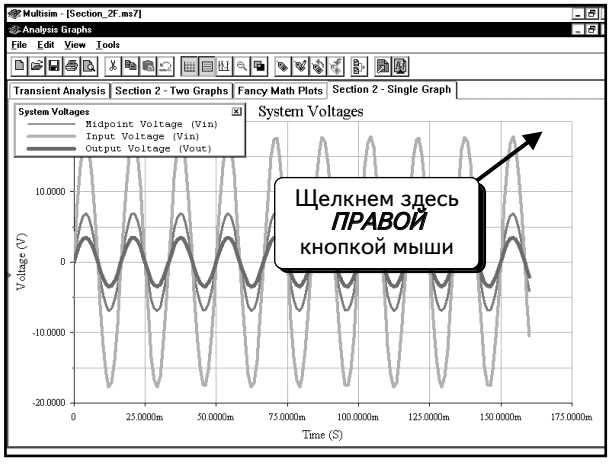
2.6.3. Изменение заголовков и ярлыков осей

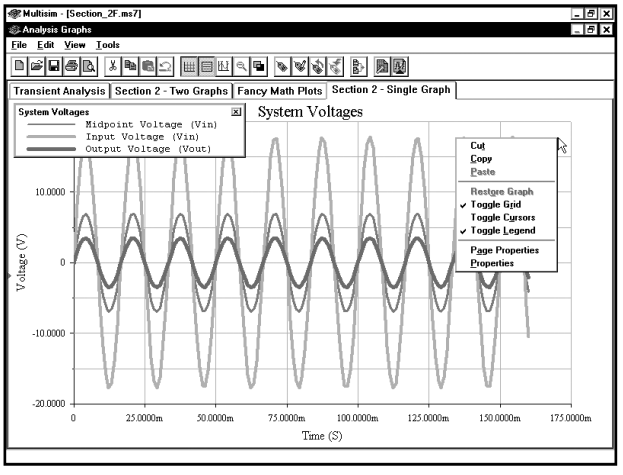
Каждый график на странице имеет заголовок, ярлык оси y (или ярлык левой оси), а также ярлык оси x (или ярлык нижней оси):



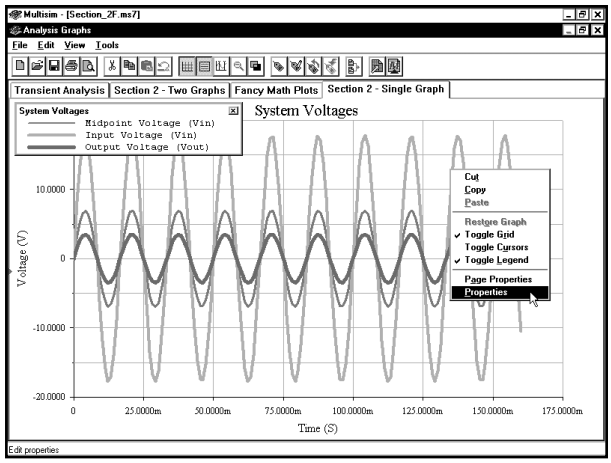


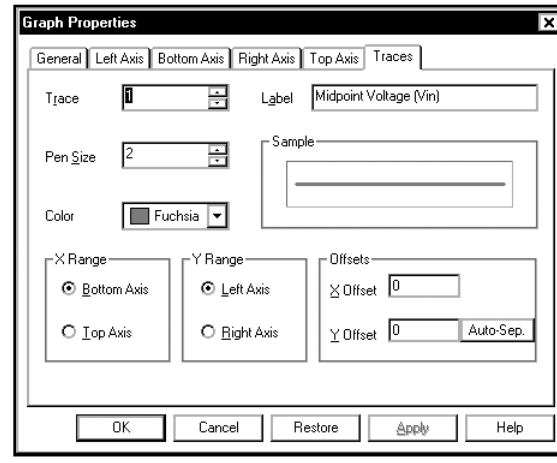
Можно открыть диалоговое окно параметров для каждого графика и внести необходимые изменения. Будем работать со страницей, которая содержит один график. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на графике. Откроется меню:



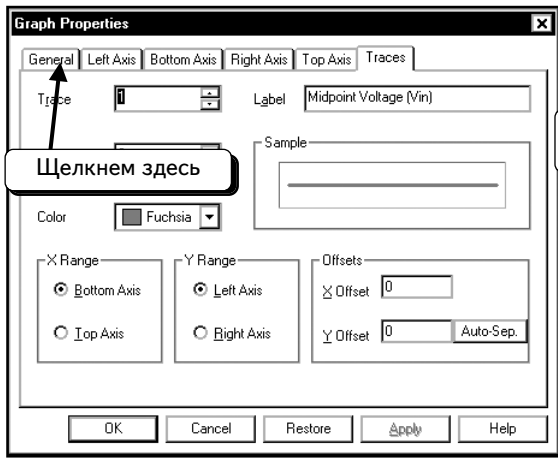


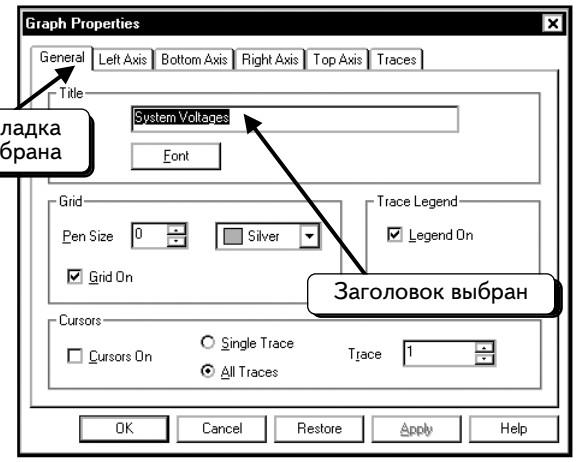
Выберем пункт **Properties**:



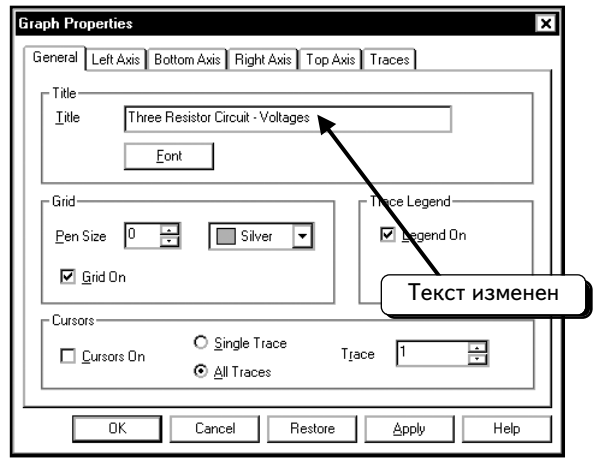


Вкладка ***General*** позволяет изменить заголовок выделенного графика. Если вкладка ***General*** не выбрана, щелкнем по ней:

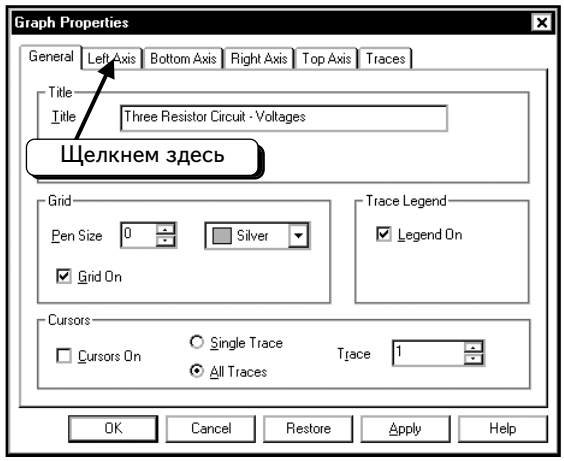


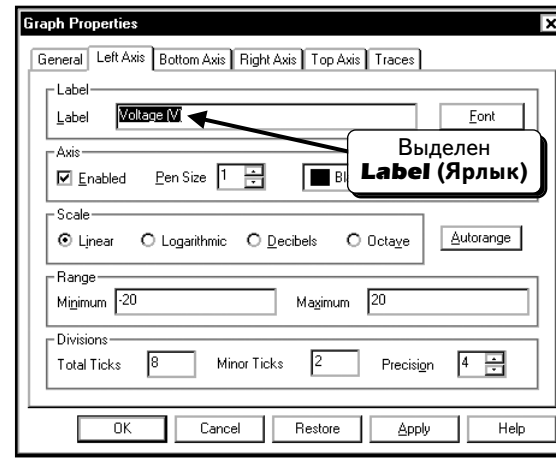


В нашем диалоговом окне выделен текст заголовка. Чтобы изменить заголовок, введем новый текст: «**`Three Resistor Circuit — Voltages`**» (Схема с тремя резисторами — напряжения):

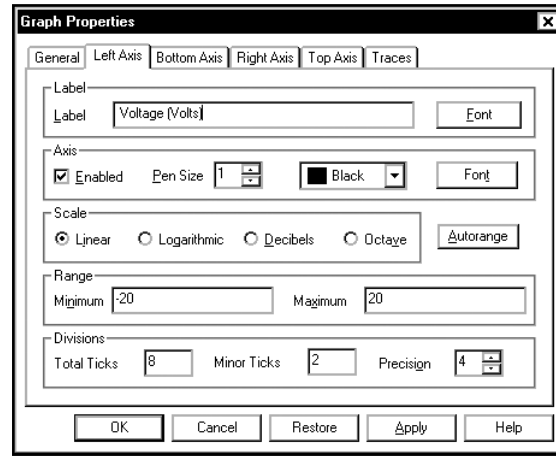


Чтобы изменить настройки для оси y, щелкнем по вкладке ***Left Axis* (Левая ось)**:

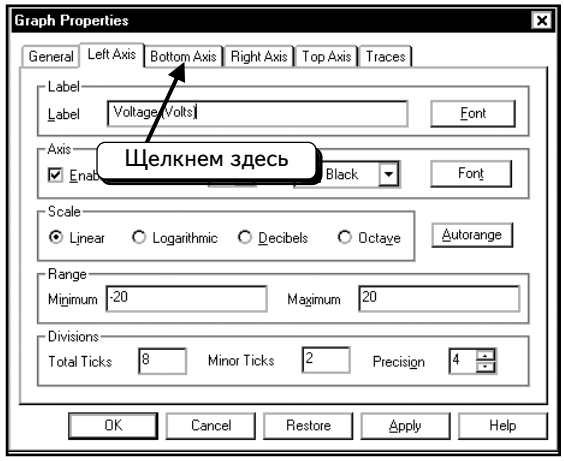


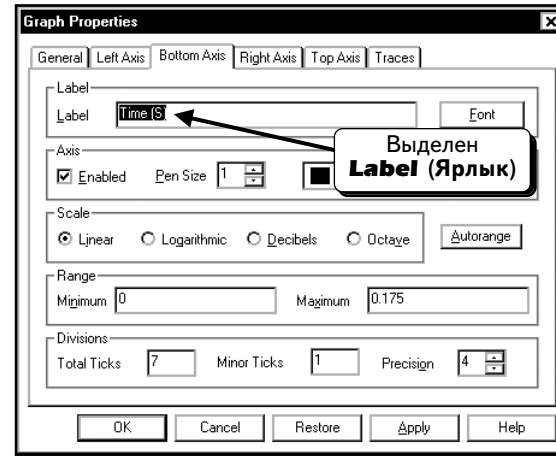


С помощью этого диалогового окна можно изменить параметры оси y. Поэкспериментируйте с доступными настройками. В нашем диалоговом окне выделен текст ярлыка. Чтобы изменить ярлык, введем новый текст: «**`Voltage (Volts)`**» (Напряжение (вольты)):

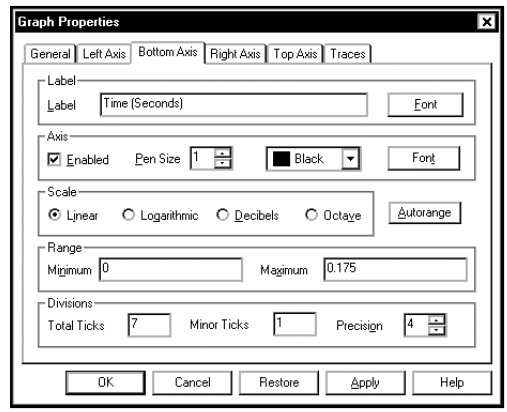


Чтобы изменить настройки для оси x, щелкнем по вкладке **Bottom Axis (Нижняя ось)**:

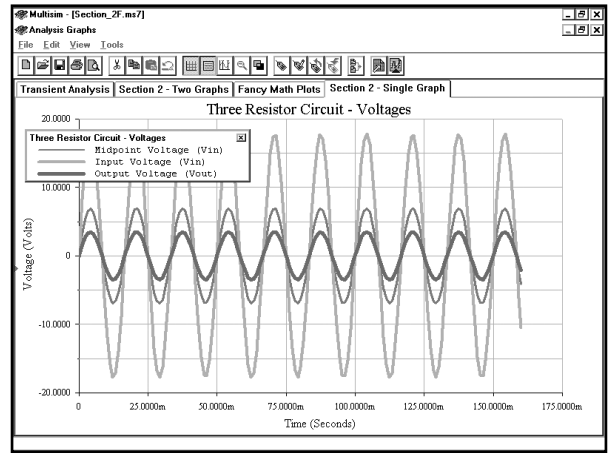




С помощью этого диалогового окна можно изменить параметры оси x. Поэкспериментируйте с доступными настройками. В данном диалоговом окне выделен текст ярлыка. Чтобы изменить ярлык, введем новый текст — «**`Time (Seconds)`**» (Время (секунды)):



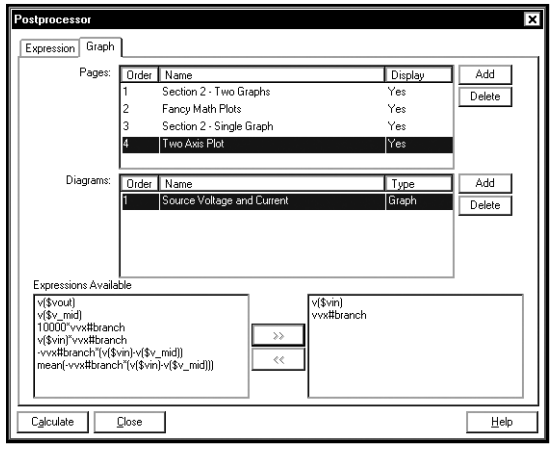
Чтобы просмотреть изменения, нажмем кнопку **Apply** или **OK**. Была нажата кнопка **OK**. Изменения будут добавлены, и диалоговое окно закроется:

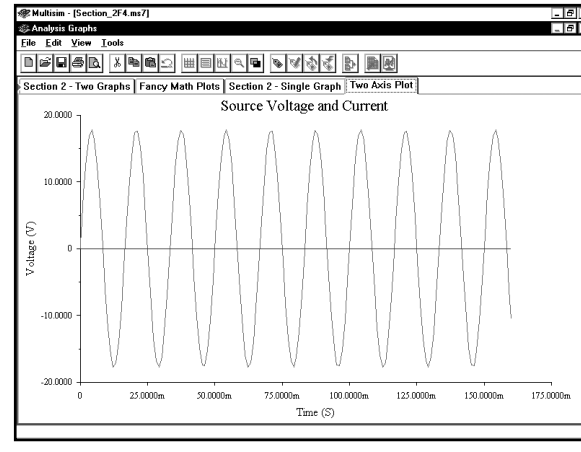


2.6.4. Добавление второй оси y

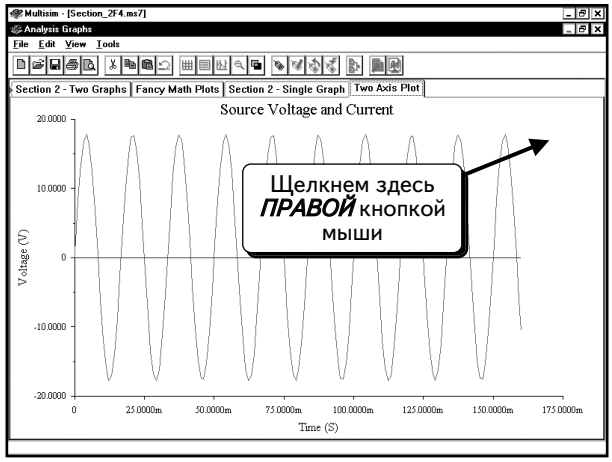
Программа Grapher позволяет использовать две оси y на одном графике. Эта функция полезна, когда надо отобразить на графике две кривые с различными амплитудами, например, кривые тока и напряжения. Во многих схемах напряжение измеряется в вольтах, а ток — в милли- или микроамперах. Если отобразить две кривые на одной оси y, кривая тока будет выглядеть как прямая линия (т. к. по сравнению с напряжением ток слишком мал). Чтобы решить эту проблему, можно использовать различные оси y для напряжения и тока.

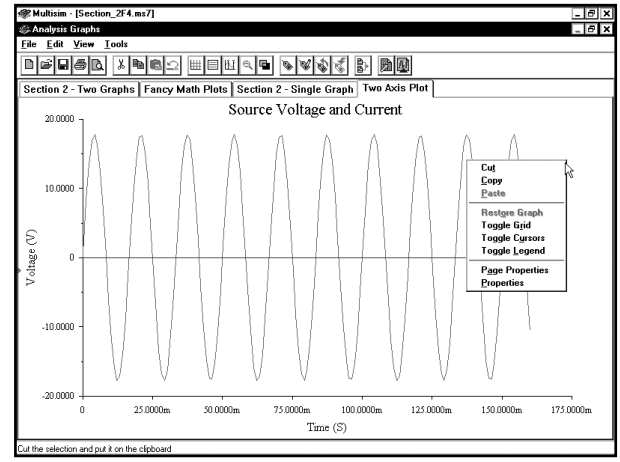
Создадим в программе Postprocessor страницу, на которой отображены напряжение и ток источника в схеме, смоделированной в начале этой главы. Выполним операции, описанные в разделе 2.1. С помощью программы Postprocessor создадим новую страницу с одним графиком. Отобразим напряжение **(vin)** и ток источника **(vvx#branch)** на графике:



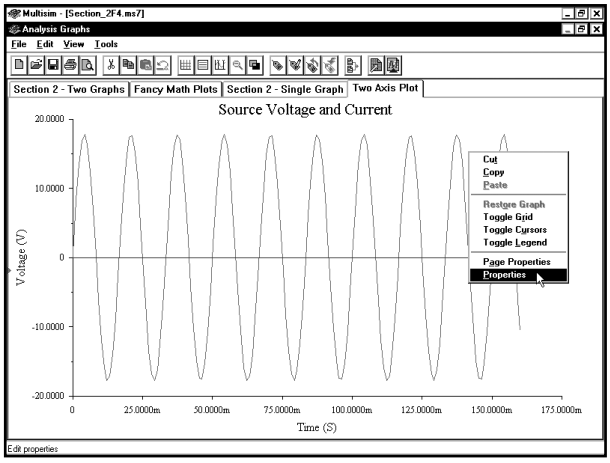


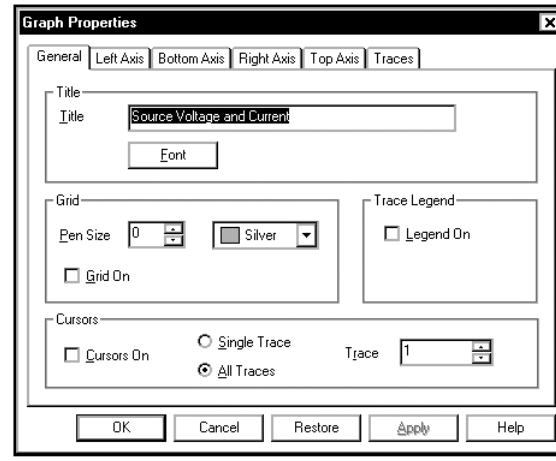
Необходимо открыть диалоговое окно **Graph Properties (Параметры графика)**, чтобы внести изменения. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на графике, чтобы открыть меню, показанное ниже:



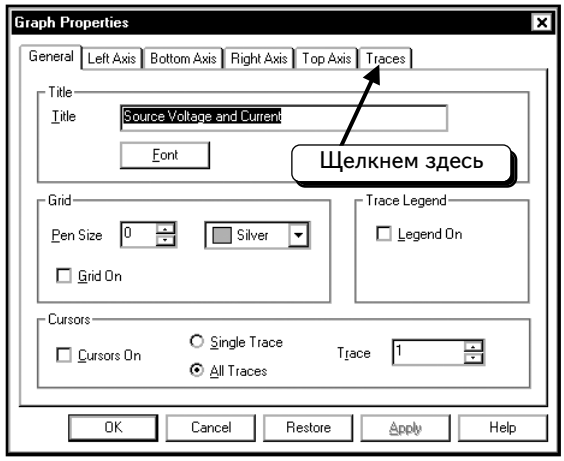


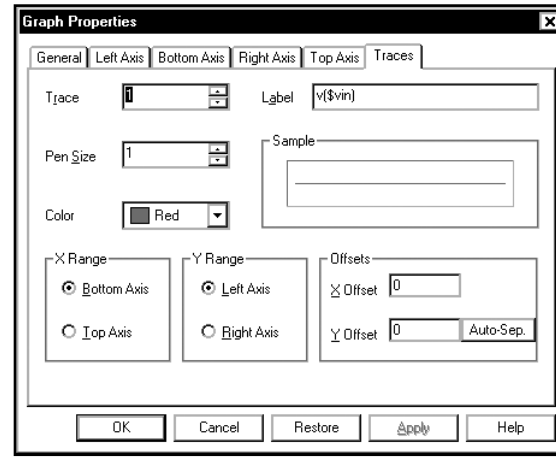
Выберем пункт **Properties**:



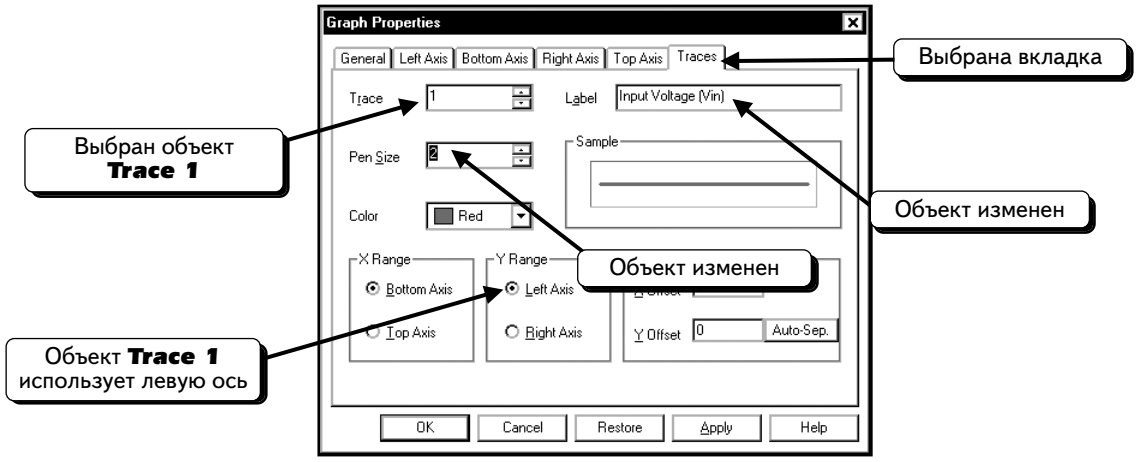


Нам нужна вкладка **Traces**. Щелкнем по ней:

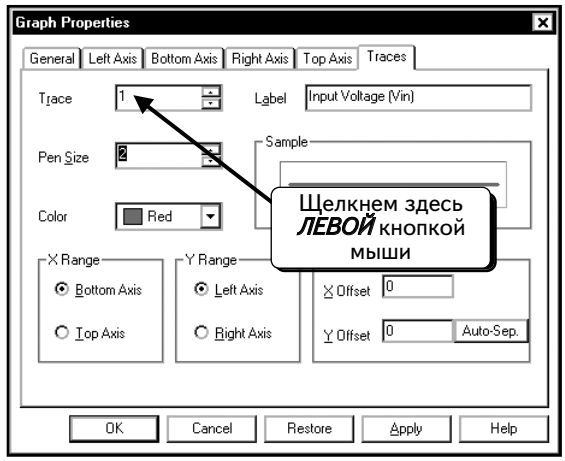


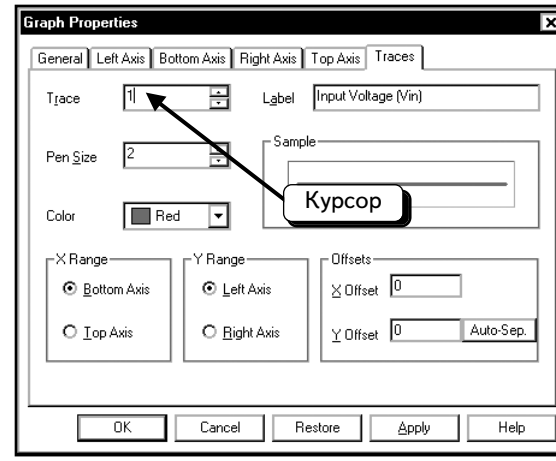


Заметим, что кривая **Trace 1** отображает входное напряжение и использует для масштабирования ось **Left Axis**. Мы не будем модифицировать ось для этой кривой. Изменим ярлык и толщину кривой:

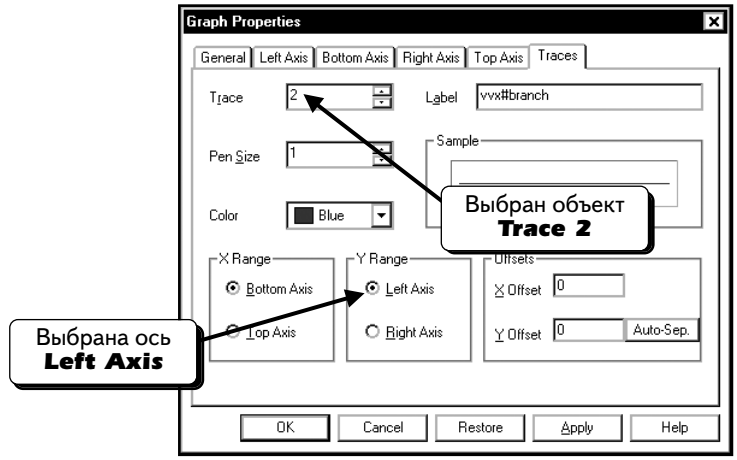


Кривая **Trace 2** должна использовать правую ось, т. е. вторую ось y. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы поместить курсор в поле **Trace**:

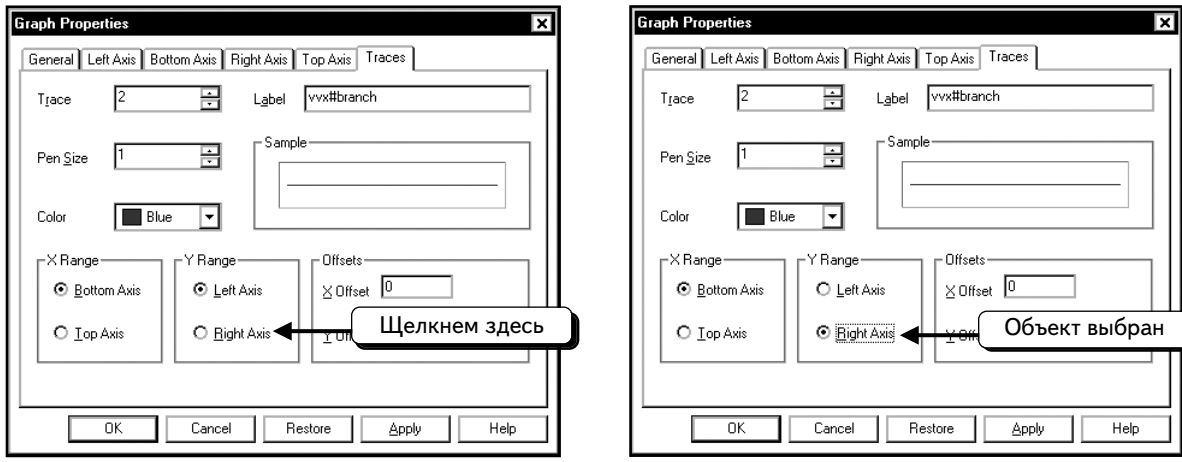




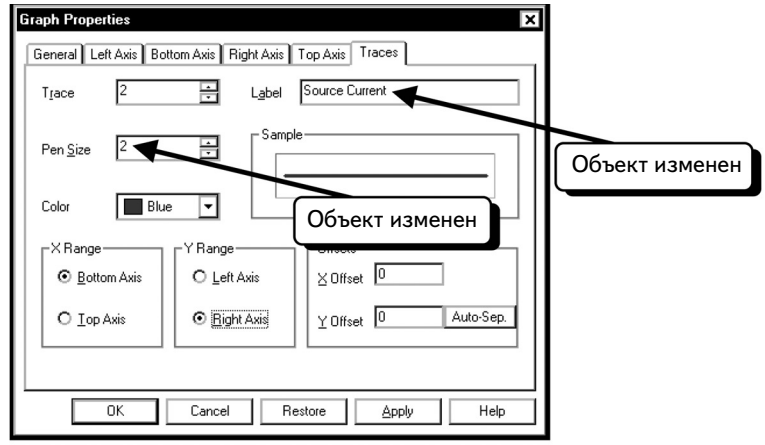
Можно пользоваться клавишами (↑↓) , чтобы изменить значение. Нажмем клавишу ↑ , чтобы выбрать кривую **Trace 2**:



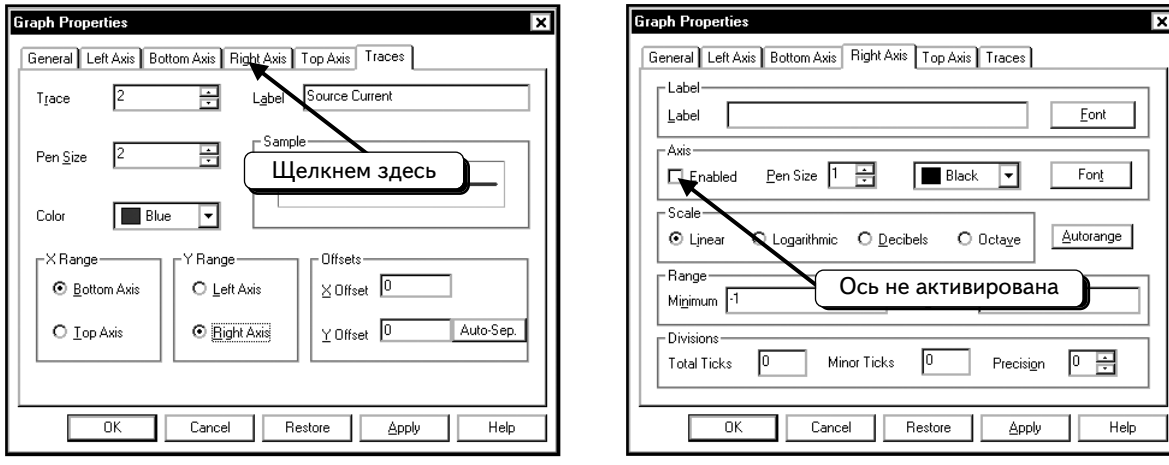
Кривая **Trace 2** также использует левую ось. Если надо, чтобы эта кривая использовала правую ось, щелкнем по оси **Right Axis**. Ось будет выбрана:



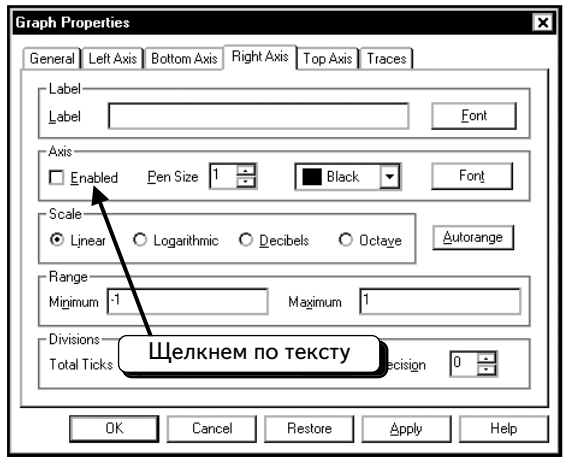
Изменим значение параметра ***Pen Size*** на **2**, а текст ярлыка — на «`Source Current`» :

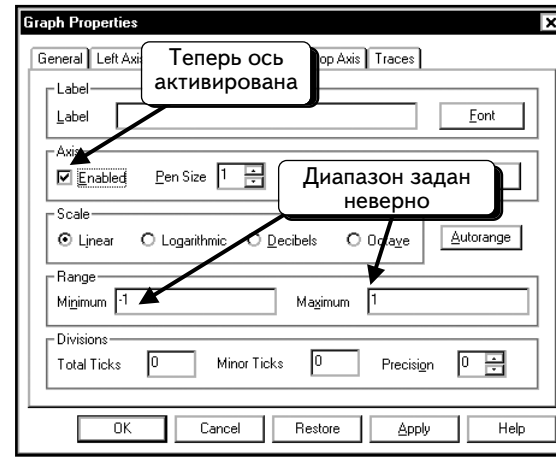


Для второй кривой теперь используется правая ось. Чтобы определить свойства этой оси, выберем вкладку ***Righ Axis***:

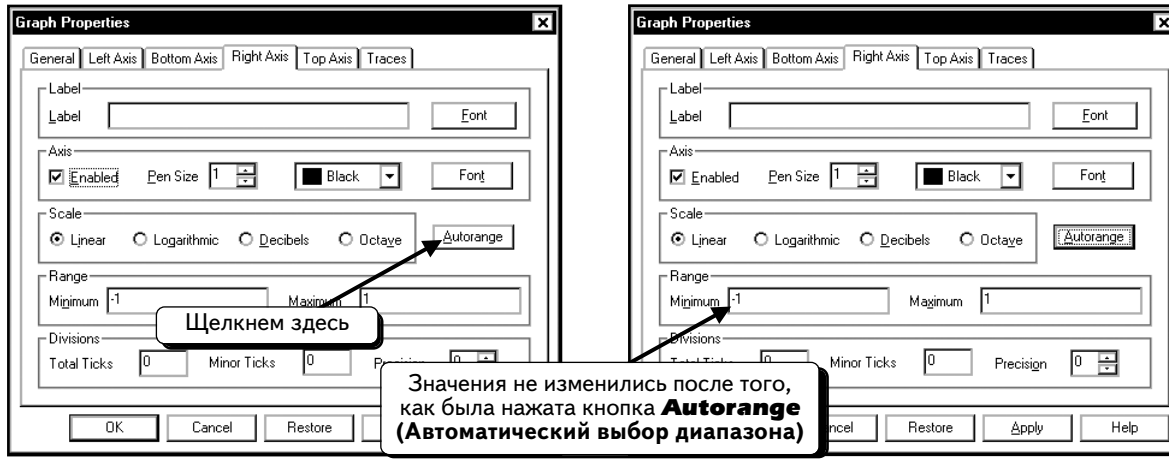


Пока для этой оси ничего не определено. Сначала нужно получить к ней доступ. Щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по опции **Enabled (Активирована)**, чтобы выбрать ее:

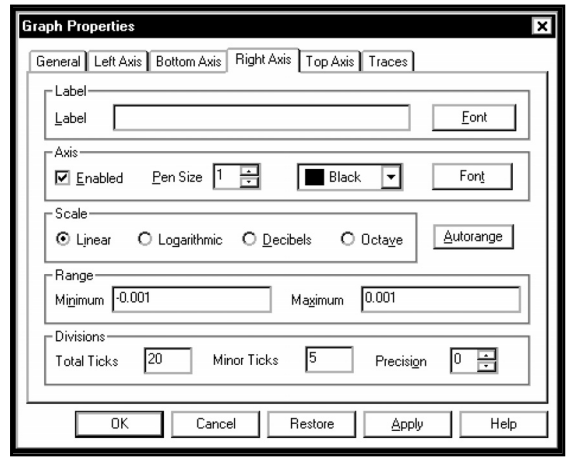




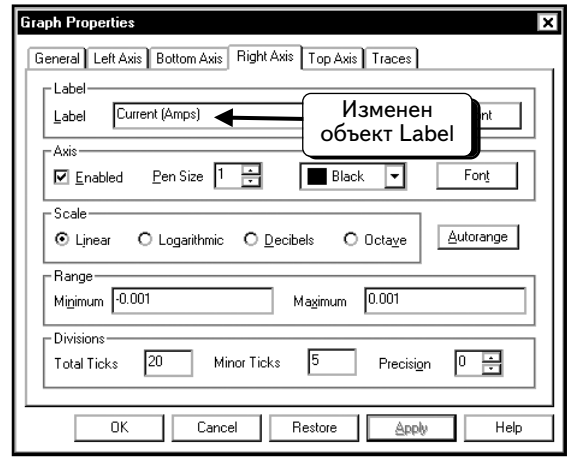
Заметим, что диапазон настроен от **–1** до **1**. Такой диапазон не подходит для отображения кривой тока. Можно ввести значения вручную или использовать автоматическую настройку. Нажмем кнопку ***Autorange*** **(Автоматическая настройка диапазона)**, чтобы программа Multisim настроила параметры ***Range*** **(Диапазон)** и ***Divisions*** **(Деления)**:



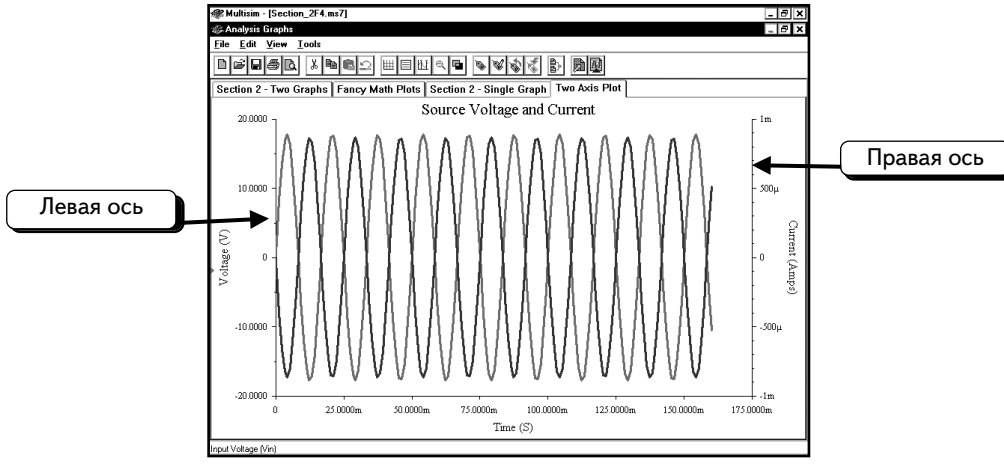
После того как была нажата кнопка ***Autorange***, диапазон не изменился, поэтому нам придется внести изменения вручную. Из предыдущего анализа этой схемы мы знаем, что диапазон от **–1** до **1** мА отвечает нашим требованиям. Введем эти значения вручную. Настроим параметры ***Total Ticks*** **(Общее число делений)** на `20`, параметр ***Minor Ticks*** **(Малые деления)** — на `5`, а параметр ***Precision*** **(Точность)** — на `0`. Эти настройки определяют разметку оси. Настроим параметры методом проб и ошибок:



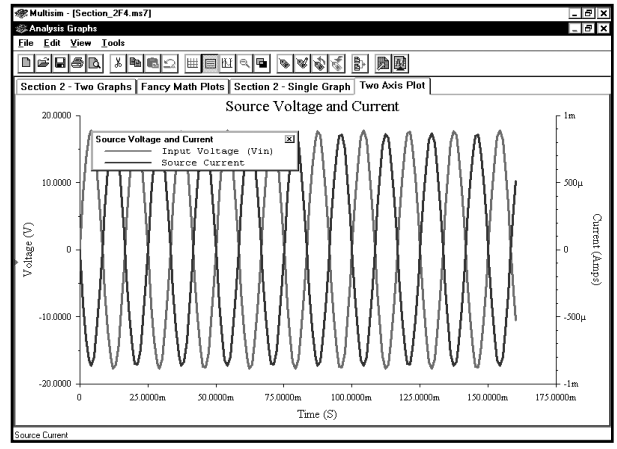
И последнее: изменим ярлык для оси. Введем в поле **Label** текст «`Current(Amps)`»:



Чтобы просмотреть результаты изменений, нажмем кнопку **OK**:

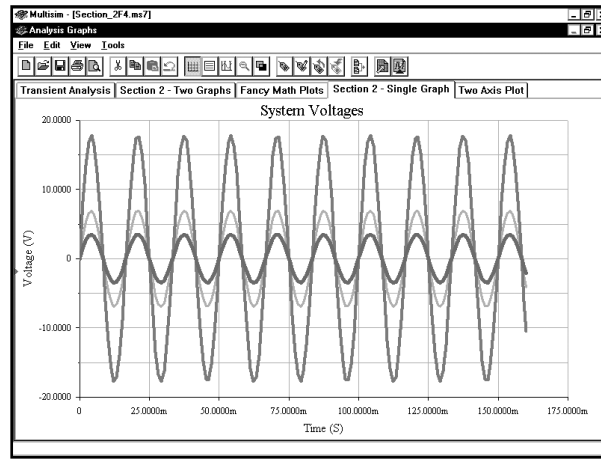


Можно добавить сетку и легенду (см. раздел 2.6.1):

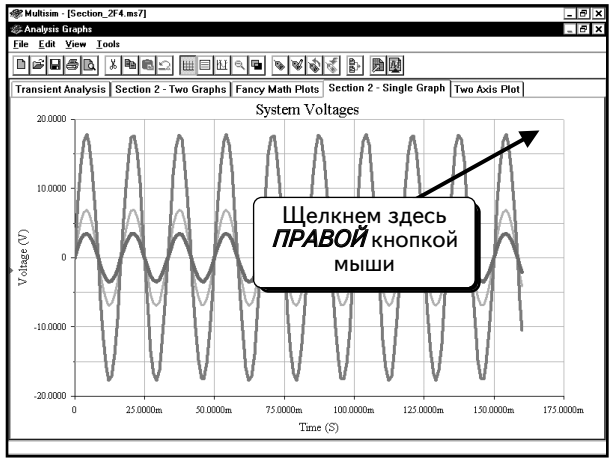


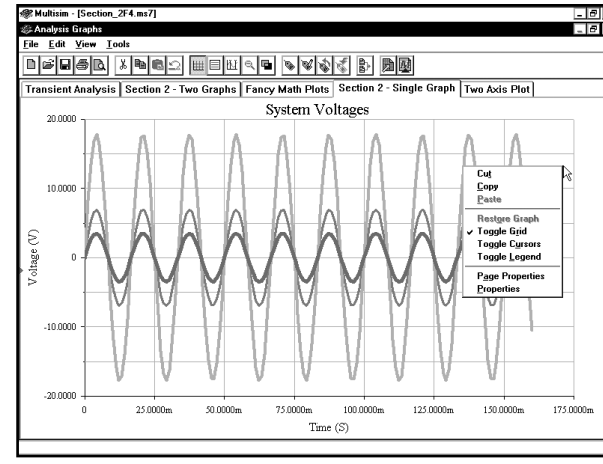
2.7. Использование курсора

Курсоры позволяют получить числовые данные из графика. Можно пользоваться курсорами на страницах с одним графиком с одной кривой, с одним графиком, включающим несколько кривых, а также с несколькими графиками, состоящими из нескольких кривых. Сначала выберем график, который был создан ранее:

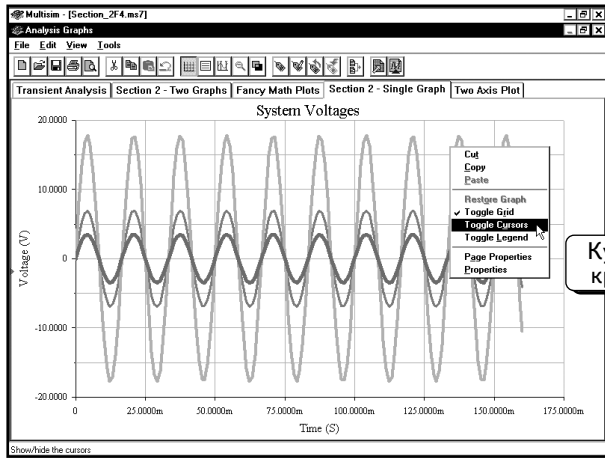


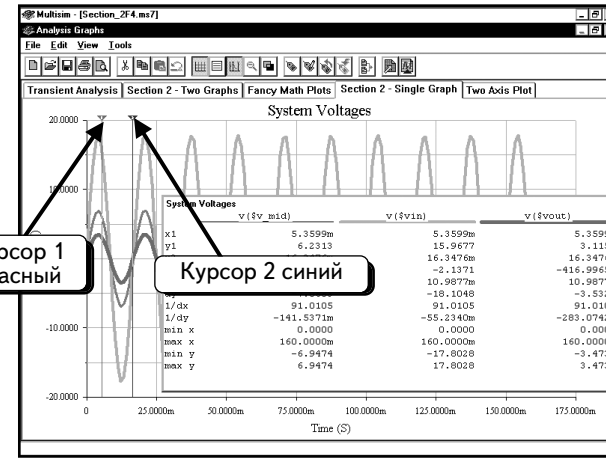
Существуют два способа активации курсоров: с помощью ***ПРАВОЙ*** кнопки мыши или диалогового окна **Graph Properties**. Здесь будет рассказано о каждом способе. Сначала воспользуемся ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и щелкнем ею по пустому месту на графике:



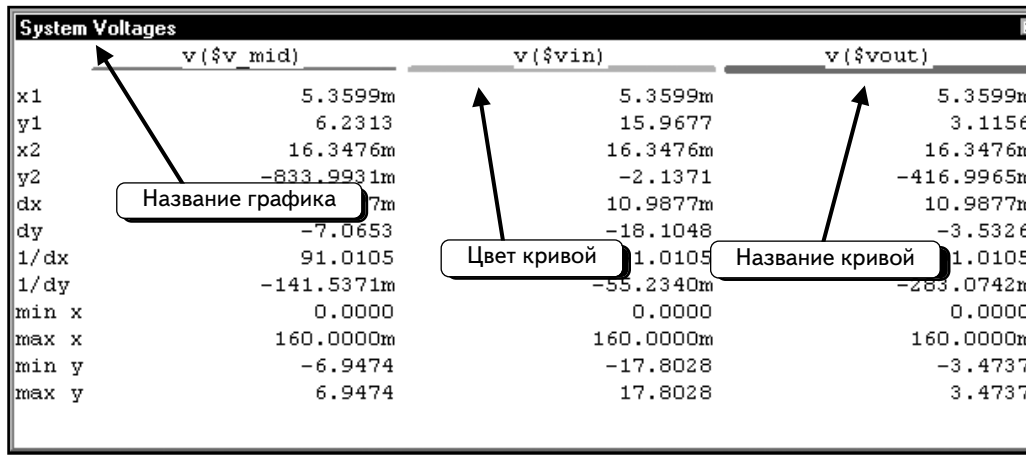


Выберем в меню пункт **Toggle Cursors (Активировать курсоры)**:

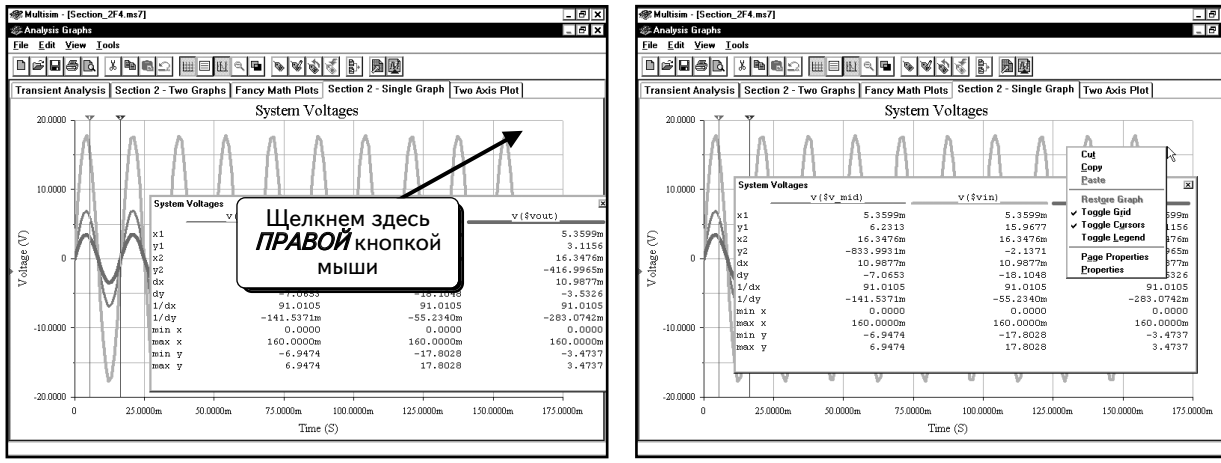




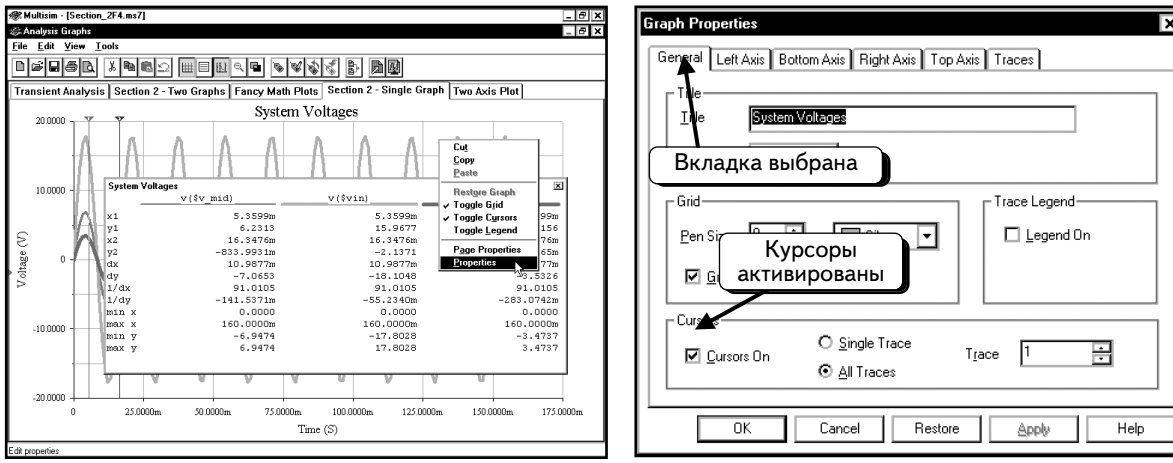
На странице будут отображены два курсора: курсор 1 — красным цветом, а курсор 2 — синим. Сведения по всем кривым будут показаны в информационном диалоговом окне:



В окне видны сведения для графика ***System Voltages***. Так как страница состоит из одного графика, эта информация очевидна. Если бы на странице было несколько графиков, сведения в окне были бы более полезными. Также видно, что для всех кривых графика отображены числовые данные. Если нужно просмотреть информацию только об одной кривой, воспользуемся диалоговым окном **Graph Properties**. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на графике:

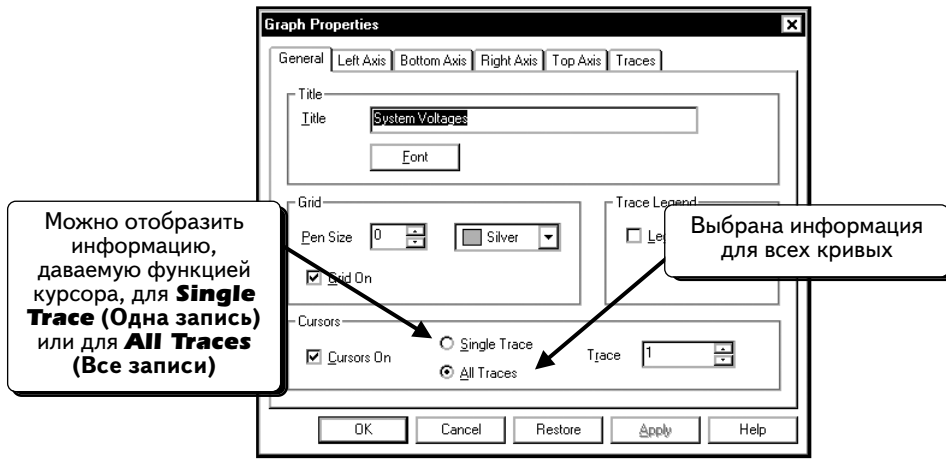


Выберем пункт меню **Properties**:

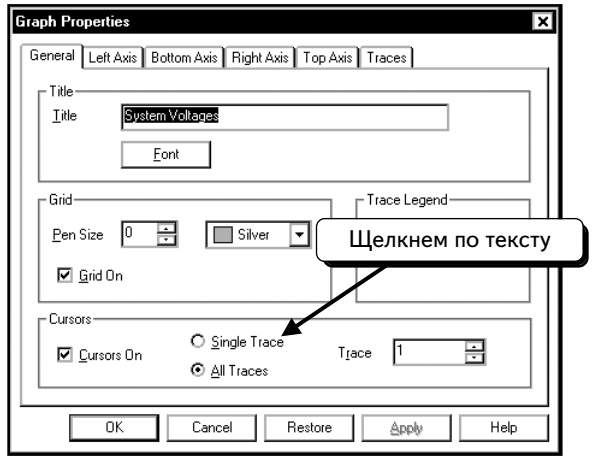


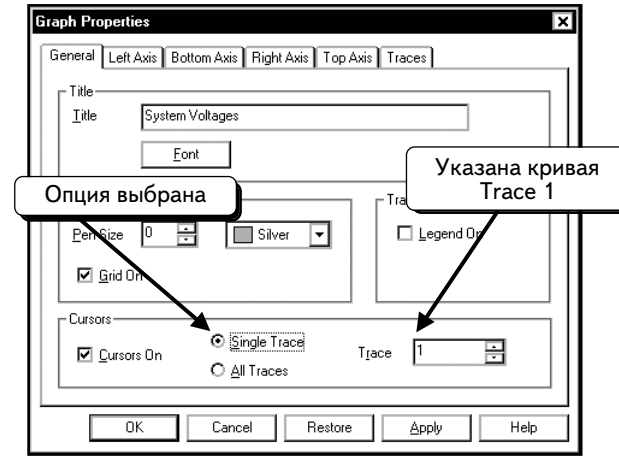
В открывшемся диалоговом окне выбрана вкладка ***General***. Если в вашем окне выбрана другая вкладка, надо щелкнуть по вкладке ***General***. Диалоговое окно показывает, что курсоры уже активированы. Они были активированы с помощью ***ПРАВОЙ*** кнопки мыши. Но можно было бы сделать это и с помощью опции ***Cursors On* (Активировать курсоры)**.

Это диалоговое окно позволяет задать состав кривых, для которых будут использоваться курсоры, изменив информацию в разделе **Cursors**:

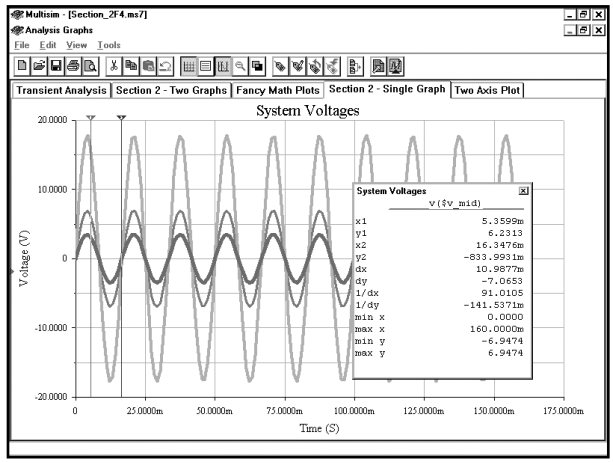


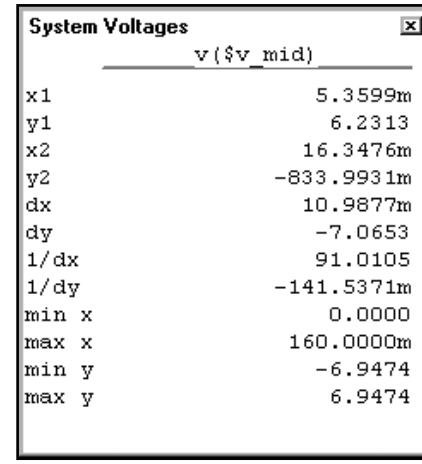
Можно настроить это окно на отображение сведений об одной или обо всех кривых и, кроме того, выбрать кривую, информация о которой будет показана. Это окно настроено на отображение информации обо всех кривых ***All Traces* (Все кривые)**. В качестве примера покажем, как настроиться на вывод данных только для кривой ***Trace 1***. Щелкнем по опции ***Single Trace* (Одна кривая)**:



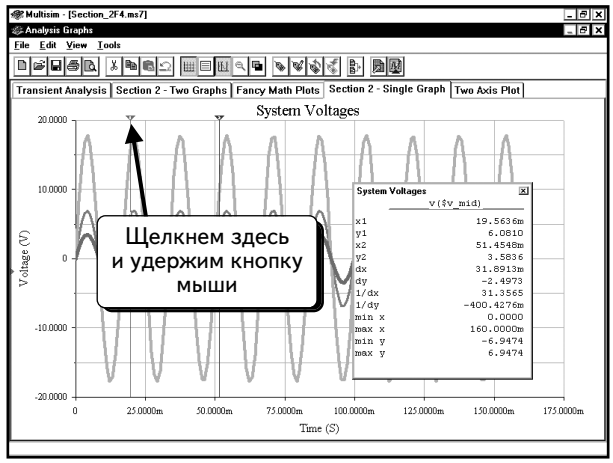


По умолчанию выбирается кривая ***Trace 1***. При желании можно изменить настройку. Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения. Когда вернемся в окно Grapher, в информационном диалоговом окне курсора будет показана информация только для кривой ***Trace 1***:





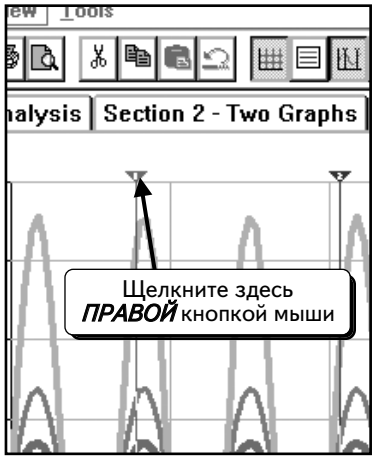
Теперь известно, как отобразить сведения для курсора. Далее расскажем, как перемещать курсоры. Для этого переместим символ в виде треугольника. Например, для того чтобы переместить курсор 1 щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по красному треугольнику и будем удерживать кнопку нажатой:

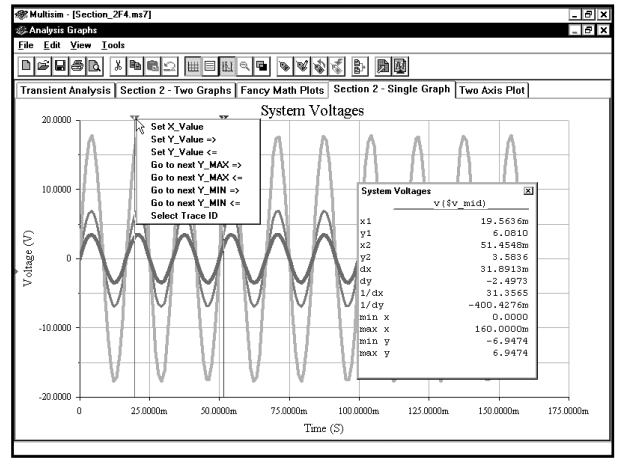




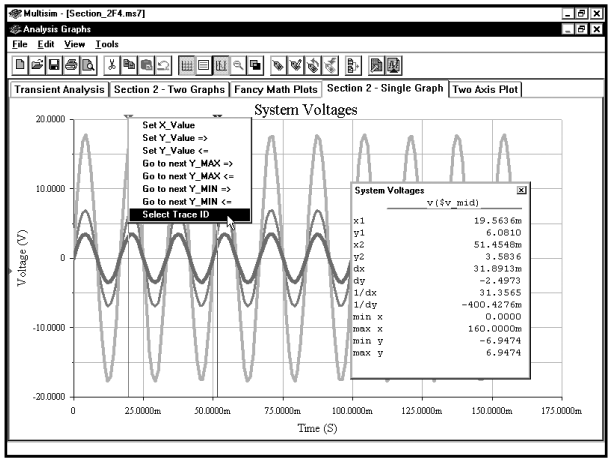
Продолжая удерживать нажатой ***ЛЕВУЮ*** кнопку мыши, переместим курсор. При его перемещении значения в информационном диалоговом окне будут изменяться. Когда курсор окажется в нужном месте, отпустим кнопку мыши. Чтобы переместить курсор **2**, щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши по синему треугольнику.

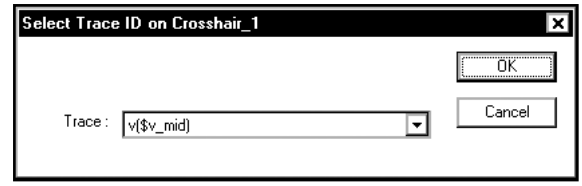
Кроме перемещения курсора, можно воспользоваться командами поиска. Если щелкнуть ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по курсору, появится меню:



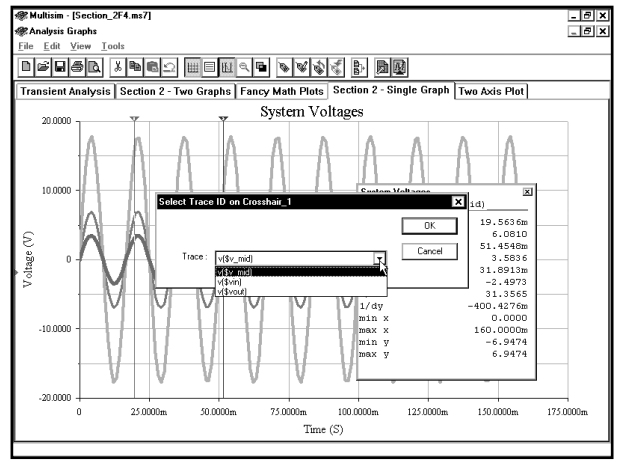


Эти команды меню позволяют выполнять поиск на кривой и помещать курсоры в определенные точки. Можно щелкнуть правой кнопкой мыши по курсору **1** или **2**. Покажем пример только для курсора **1**. Сначала выделим нужную кривую. Выберем опцию **Select Trace ID (Выбрать кривую)**:



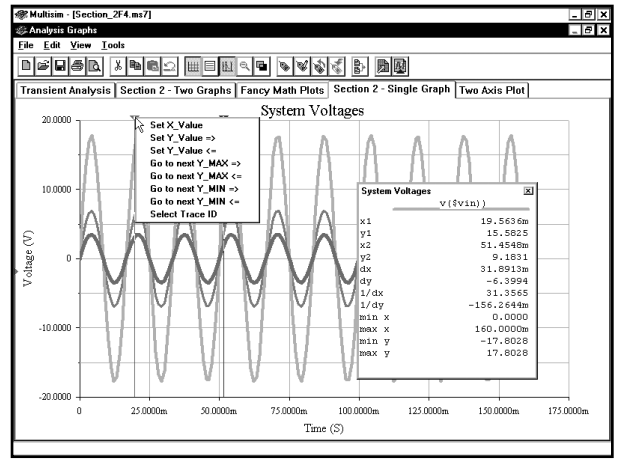


Символ ▼ позволяет выбирать кривую для поиска:



Выберем кривую входного напряжения и нажмем кнопку **OK**. В результате поиск будет осуществляться на кривой входного напряжения.

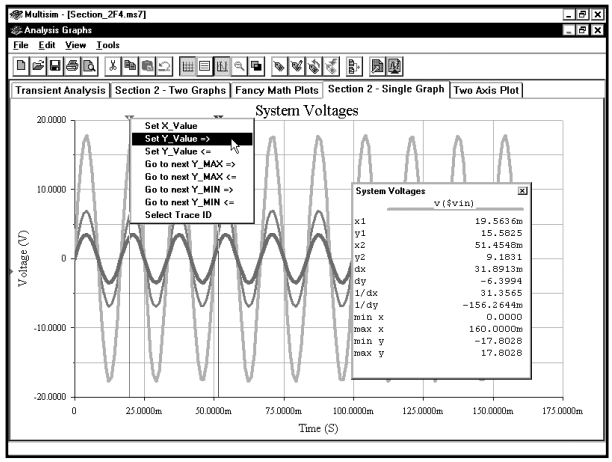
Выполним поиск определенной точки на кривой входного напряжения. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по курсору **1**, чтобы открыть контекстное меню:

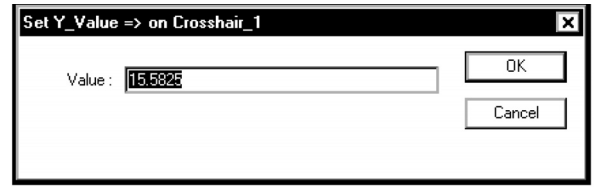


Доступные опции определенного поиска:

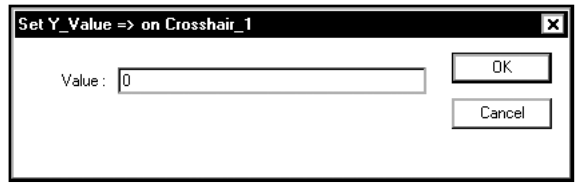
- **Set X_Value (Настроить значение по оси x)** — настраивает положение курсора по оси x на определенное значение;
- **Set Y_Value (Настроить значение по оси y) =>** — настраивает положение курсора по оси y на определенное значение. Находит ближайшую точку, расположенную правее текущего положения курсора;
- **Set Y_Value (Настроить значение по оси y) <=** — настраивает положение курсора по оси y на определенное значение. Находит ближайшую точку, расположенную левее текущего положения курсора;
- **Go to next Y_MAX (Перейти к следующему максимальному значению) =>** — настраивает положение курсора на следующее максимальное значение. Находит точку ближайшего максимума, расположенную правее текущего положения курсора;
- **Go to next Y_MAX (Перейти к следующему максимальному значению) <=** — настраивает положение курсора на следующее максимальное значение. Находит точку ближайшего максимума, расположенную левее текущего положения курсора;
- **Go to next Y_MIN (Перейти к следующему минимальному значению) =>** — настраивает положение курсора на следующее минимальное значение. Находит точку ближайшего минимума, расположенную правее текущего положения курсора;
- **Go to next Y_MIN (Перейти к следующему минимальному значению) <=** — настраивает положение курсора на следующее минимальное значение. Находит точку ближайшего минимума, расположенную левее текущего положения курсора.

Найдем, к примеру, следующее нулевое значение справа от курсора. Выберем опцию **Set Y_Value =>** :

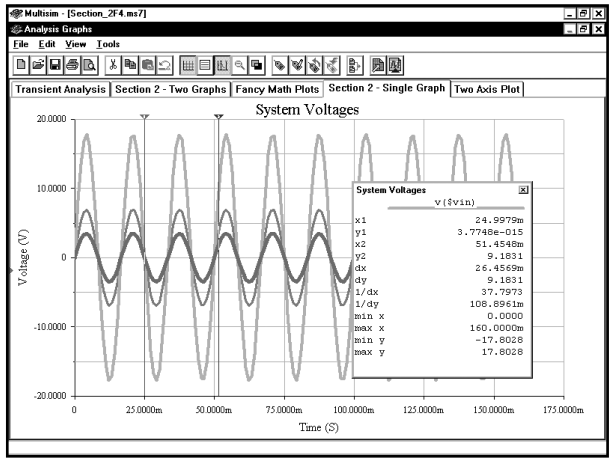


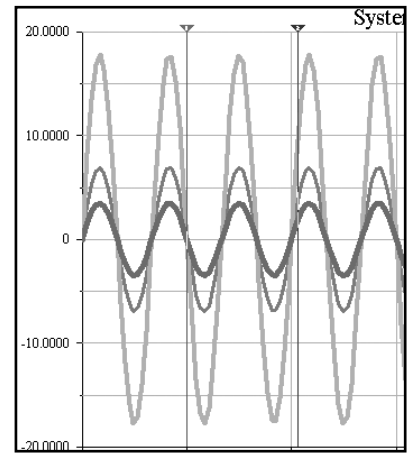


Необходимо работать с нулевым значением, поэтому введем **0**:

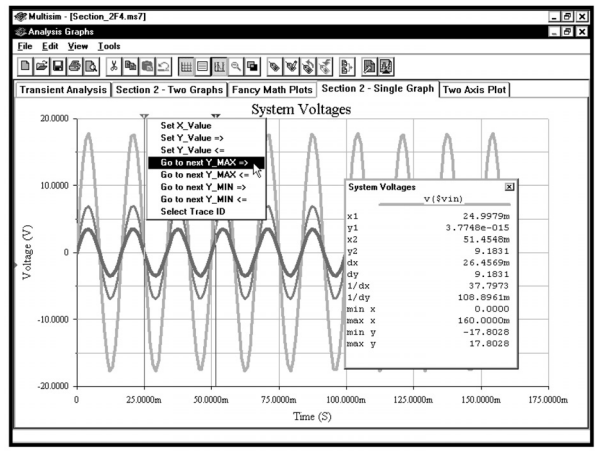


Когда нажмем кнопку **OK**, курсор переместится в следующую нулевую точку справа от текущего положения:

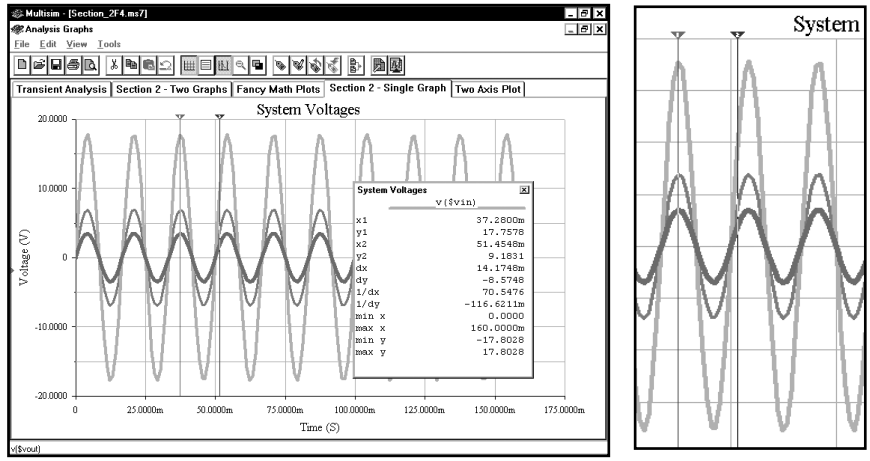




Найдем следующее максимальное значение. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по курсору **1** и выберем опцию **Go to Next Y_Max =>** :

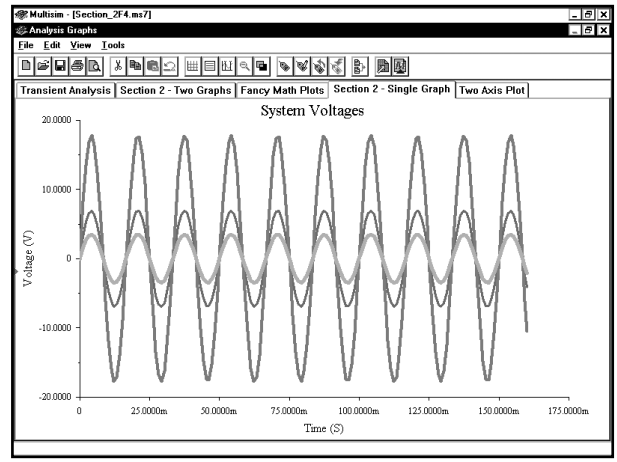


Как видим, курсор переместился в следующую точку максимума справа:

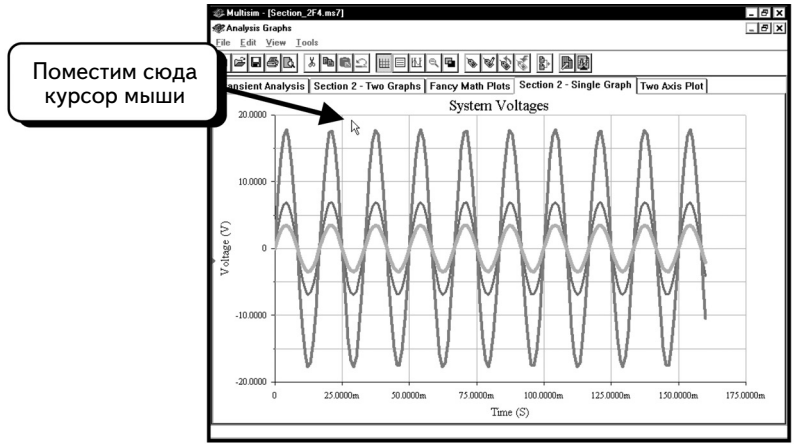


2.8. Увеличение и уменьшение масштаба

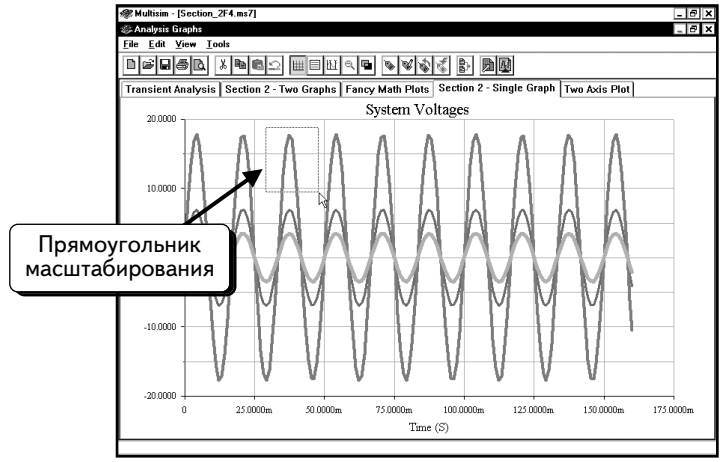
Существуют два способа увеличения масштаба в программе Grapher: можно использовать мышь или диалоговое окно Graph Properties. Если работают со страницей, которая содержит один график, проще всего применить мышь. Если на странице находится несколько графиков, пользуются диалоговым окном **Graph Properties**. Начнем со страницы с одним графиком:



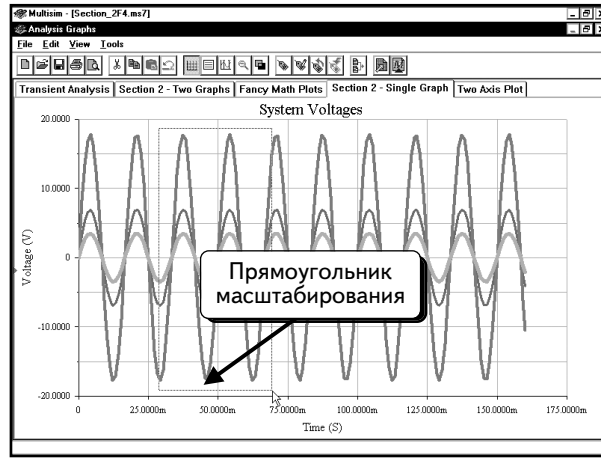
Увеличим масштаб с помощью мыши. Нарисуем курсором мыши прямоугольник, а программа Multisim увеличит масштаб в пределах этого прямоугольника. Поместим курсор мыши в верхний левый угол будущего прямоугольника:



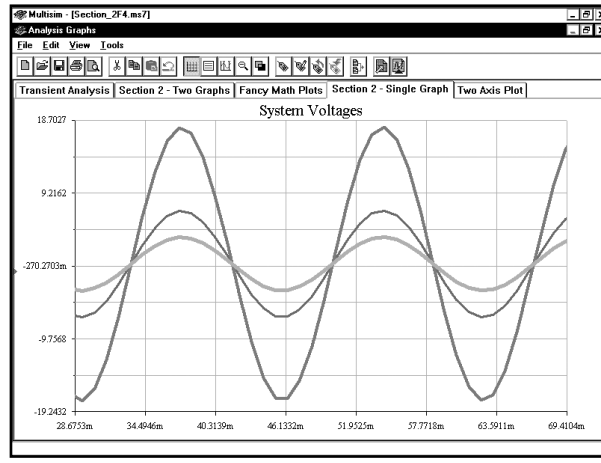
Нажмем и будем удерживать ***ЛЕВУЮ*** кнопку мыши. Переместим курсор. Будет нарисован прямоугольник:



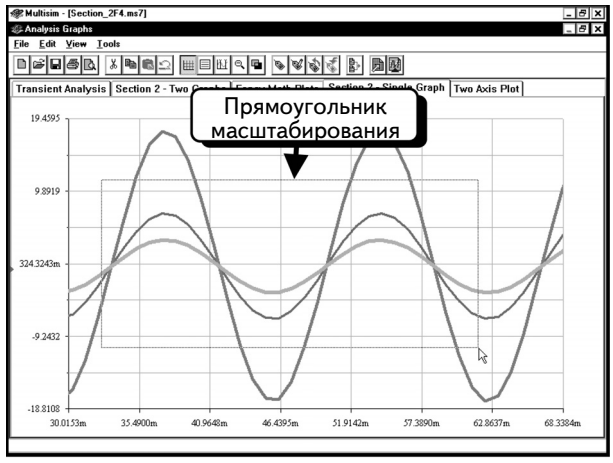
Нарисуем прямоугольник так, чтобы в нем была заключена область, масштаб которой нужно увеличить:

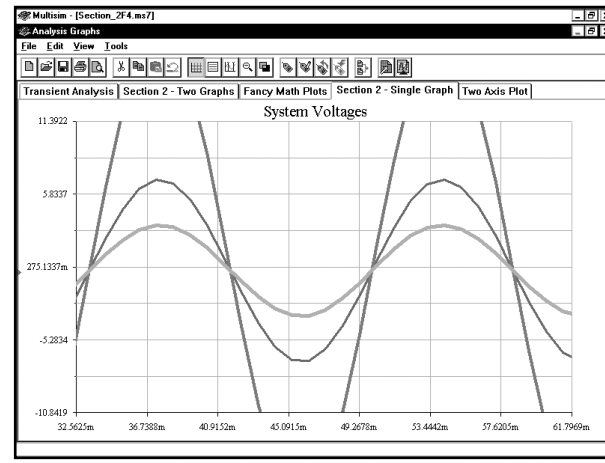


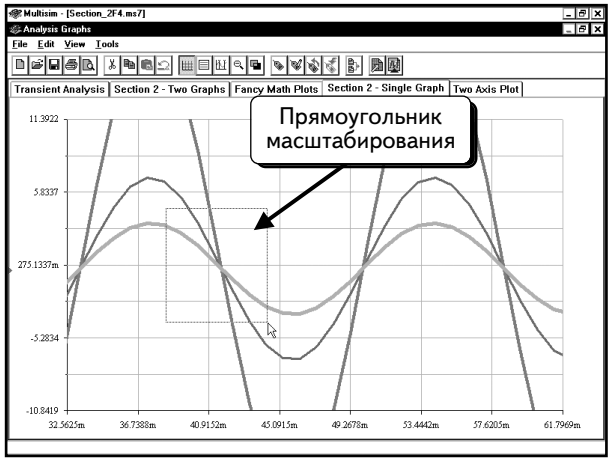
Когда отпустим кнопку мыши, программа Multisim увеличит масштаб области внутри прямоугольника:

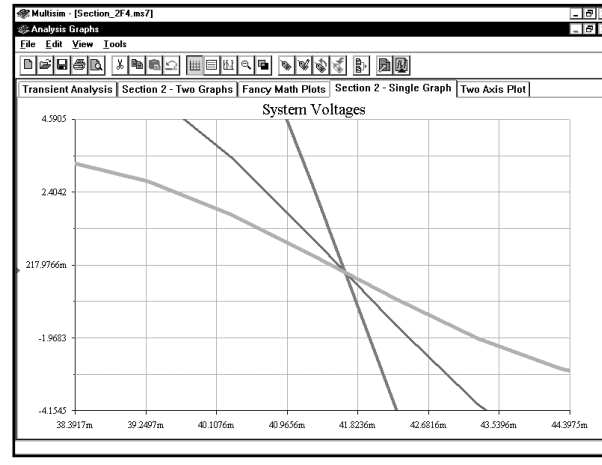


Можете повторить операцию, чтобы увеличить масштаб еще больше:

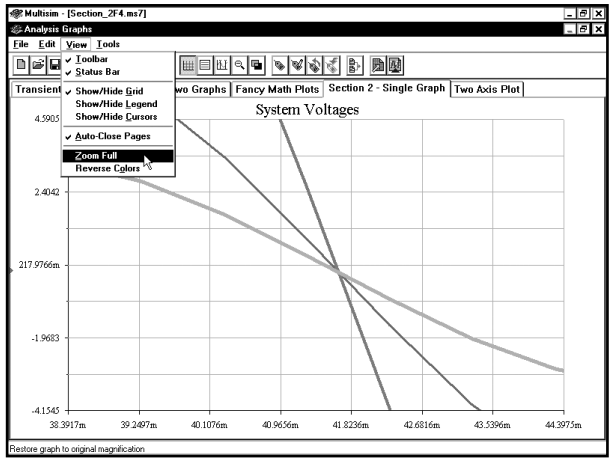


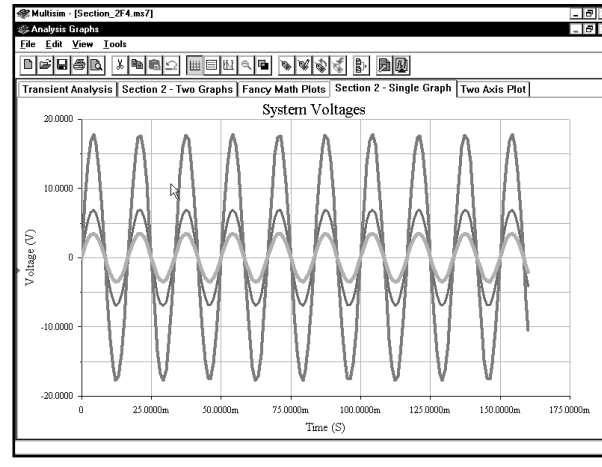




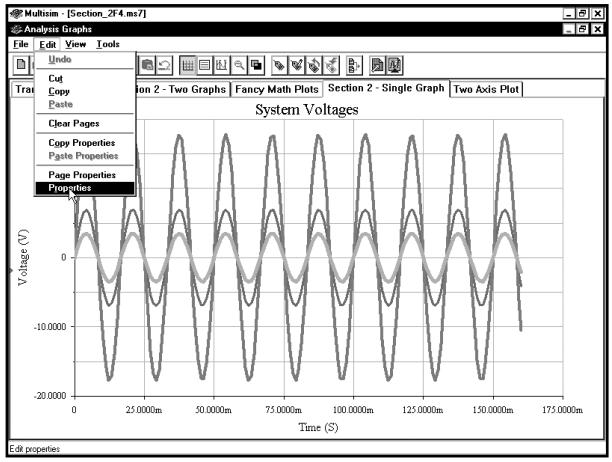


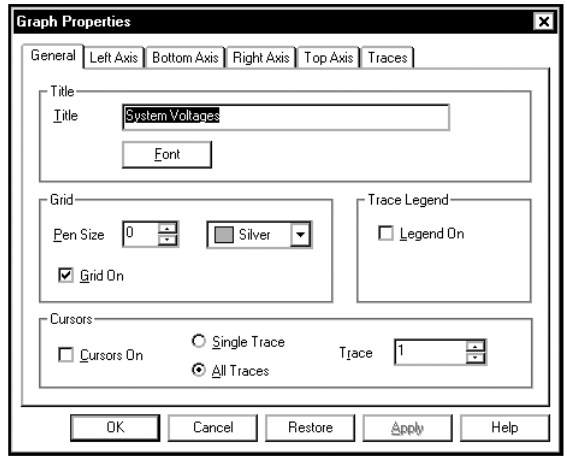
Чтобы вернуться в начальный режим просмотра, выберем в меню пункты **View ⇒ Zoom Full (Вид ⇒ Восстановить масштаб)**:



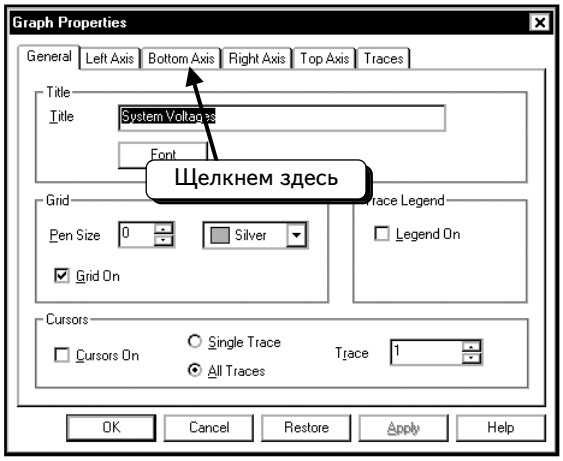


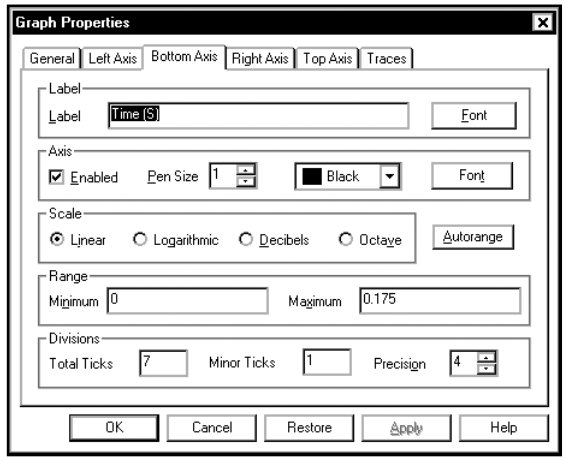
Второй метод заключается в том, чтобы изменить масштаб по осям x и y. Это позволяет точно настроить масштаб для определенной области графика. Выберем в меню пункты **Edit ⇒ Properties**, чтобы открыть диалоговое окно **Graph Properties**:



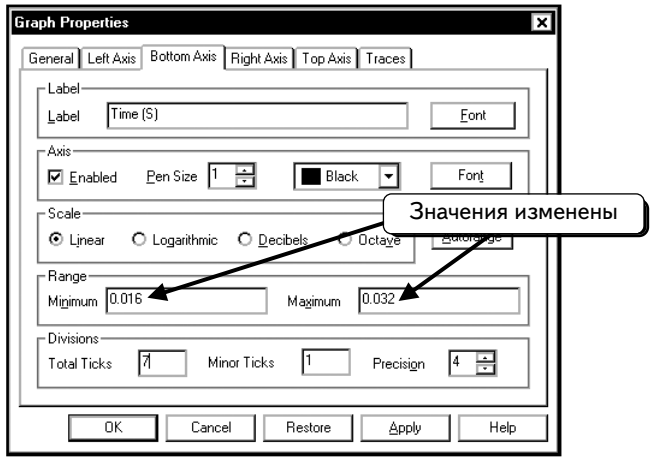


Сначала изменим масштаб для оси x (**Bottom Axis**), для чего щелкнем по вкладке **Bottom Axis**:

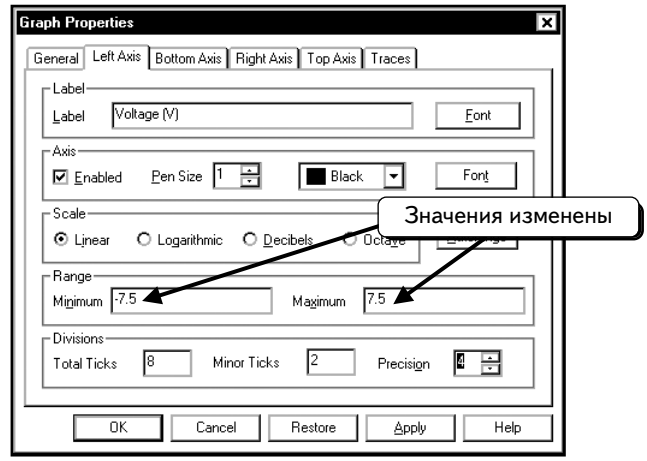




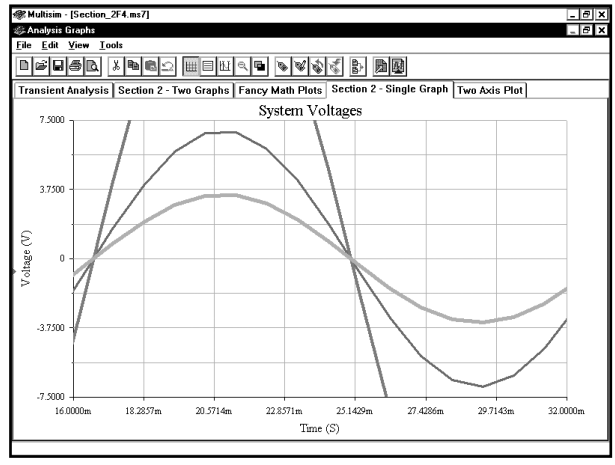
При желании изменить масштаб для второго периода диаграммы настроим диапазон оси x от `0,016` до `0,032`:



Далее изменим диапазон для оси y (**Left Axis**). Щелкнем по вкладке **Left Axis** и настроим диапазон от `-7.5` до `7.5`:

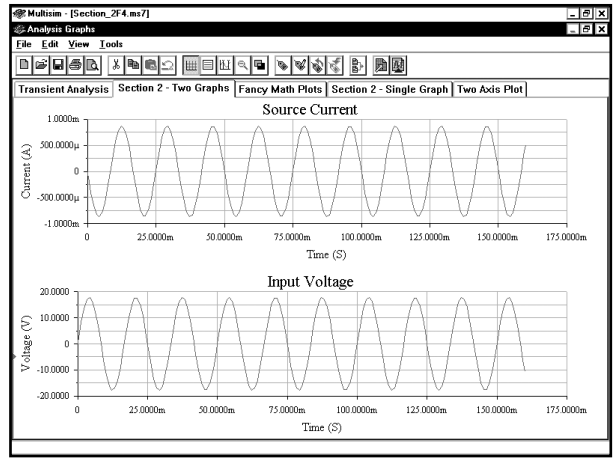


Нажмем кнопку **OK**, чтобы увеличить масштаб:

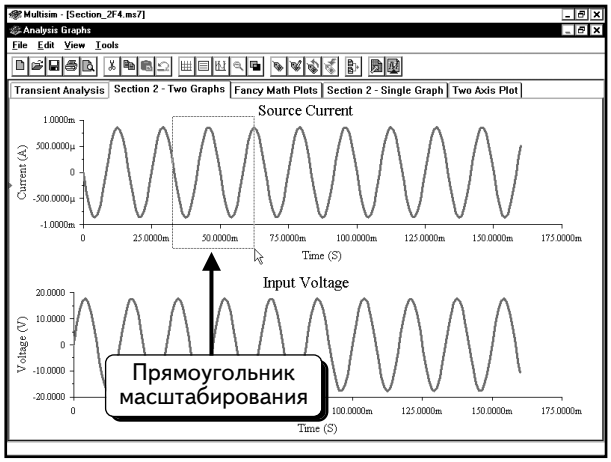


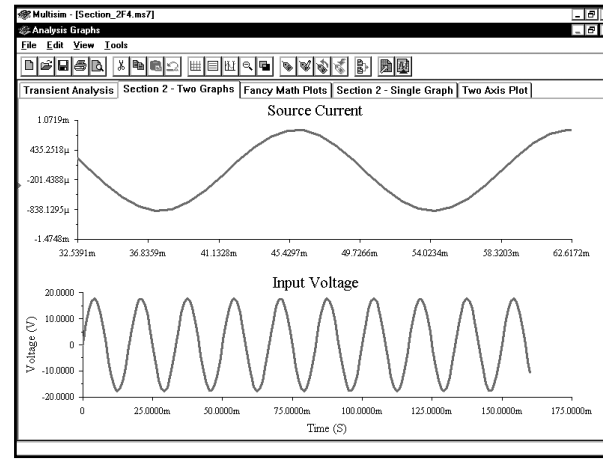
Второй метод может показаться слишком сложным. Однако его нужно использовать при работе со страницей с несколькими графиками.

Для второго примера выберем страницу с двумя графиками:



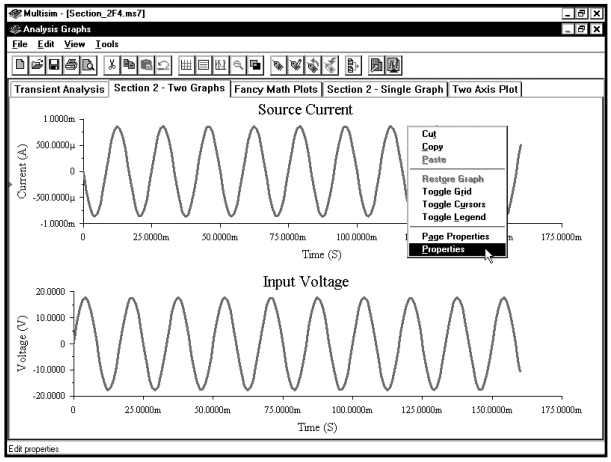
С помощью мыши увеличим масштаб для верхнего графика:

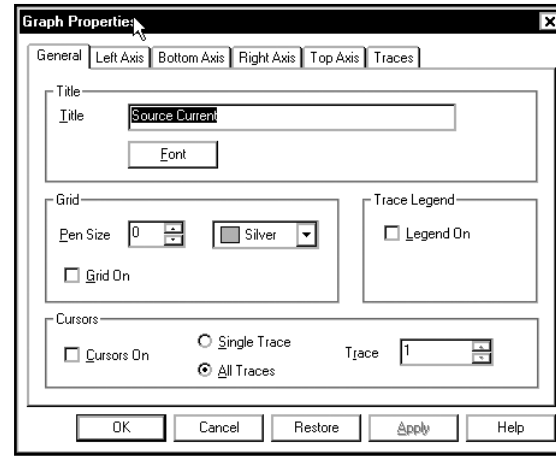




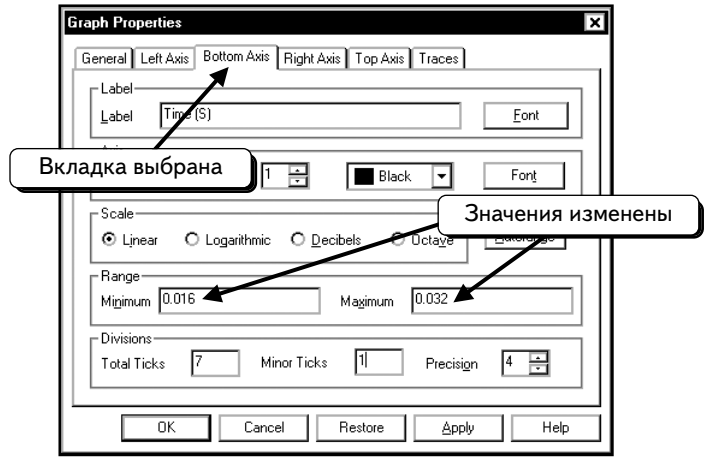
Как видим, программа Multisim изменила только верхний график. При работе с подобными графиками, как правило, необходимо использовать одинаковые оси x. Единственный способ добиться этого — настроить диапазон нижней оси для обоих графиков в диалоговом окне Graph Properties. Выберем пункты меню **View** ⇒ **Zoom Full**, чтобы вернуться в начальный режим просмотра.

Далее щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на верхнем графике и выберем в контекстном меню пункт **Properties**:

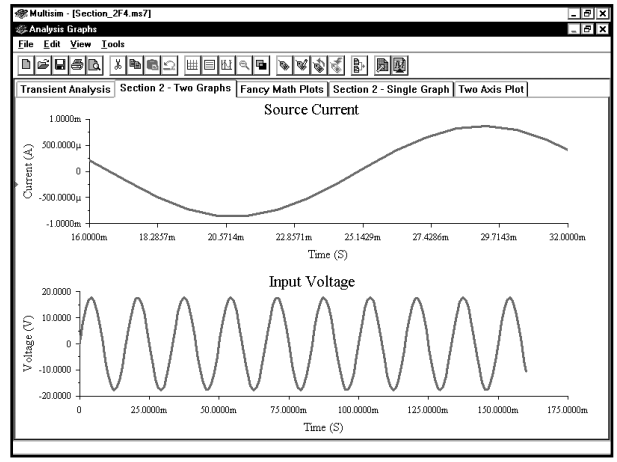




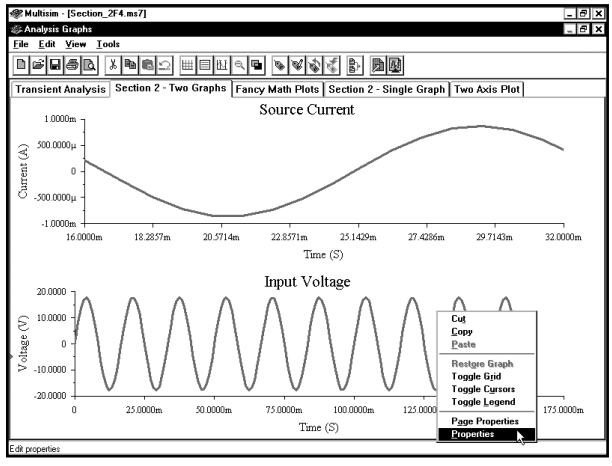
Щелкнем по вкладке **Bottom Axis** и настроим диапазон от `0,016` до `0,032`:

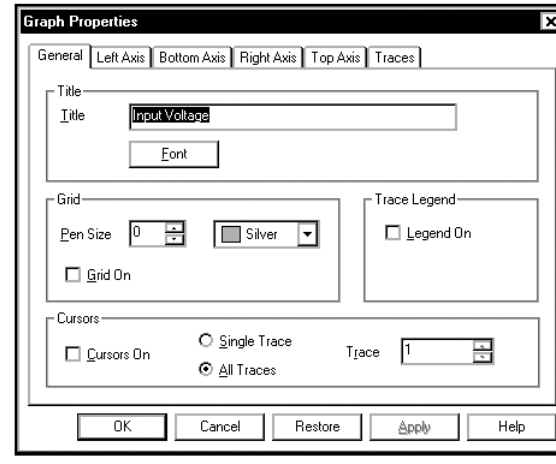


Нажмем кнопку **OK**, чтобы применить изменения к верхнему графику:

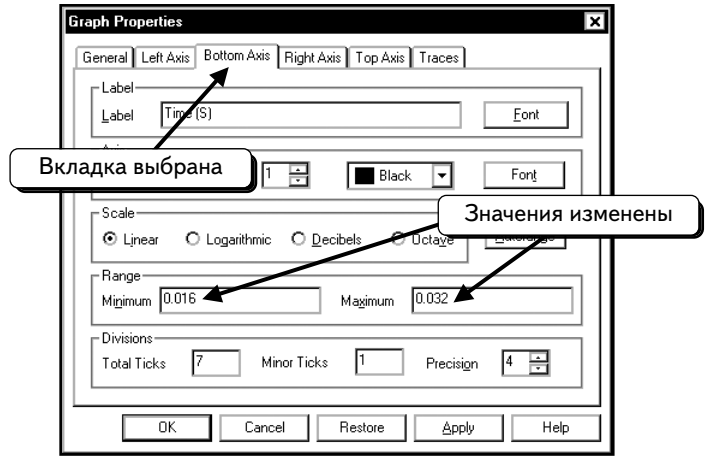


Теперь повторим операции для нижнего графика. Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по пустому месту на нижнем графике и выберем в меню пункт **Properties**:

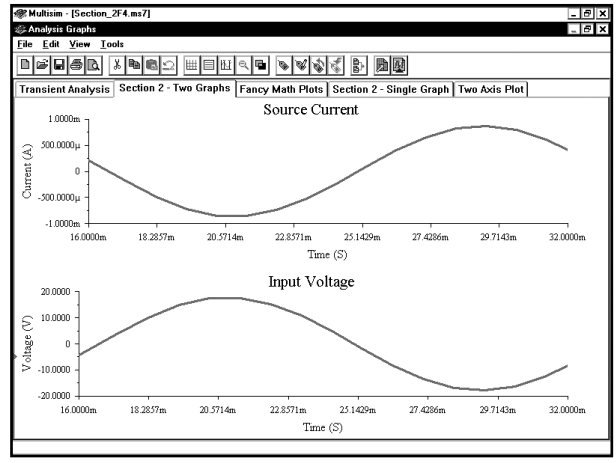




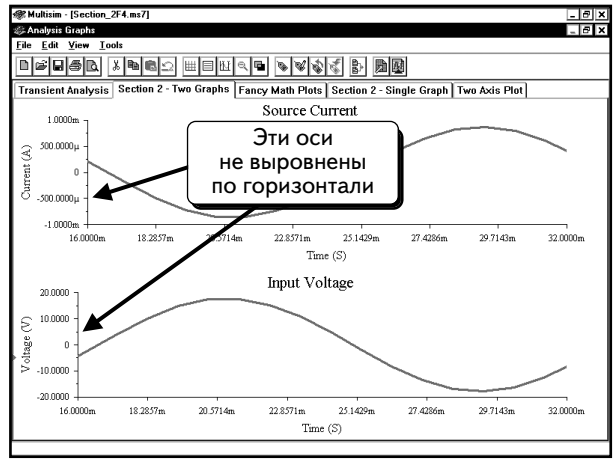
Щелкнем по вкладке **Bottom Axis** и настроим диапазон от `0,016` до `0,032`:



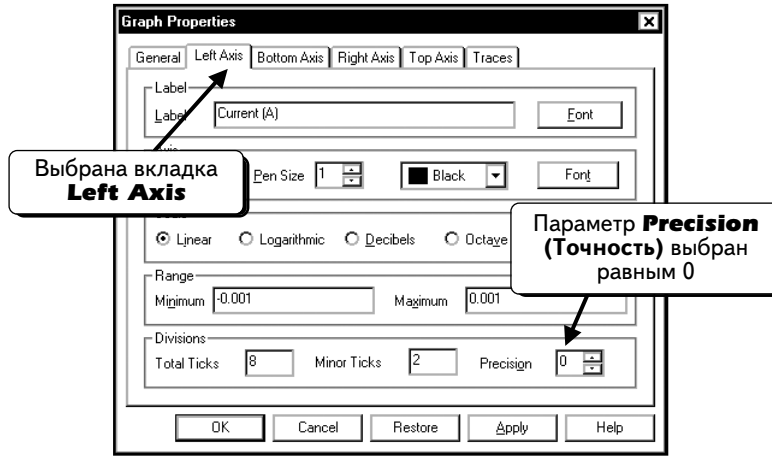
Нажмем кнопку **OK**, чтобы применить изменения к нижнему графику:



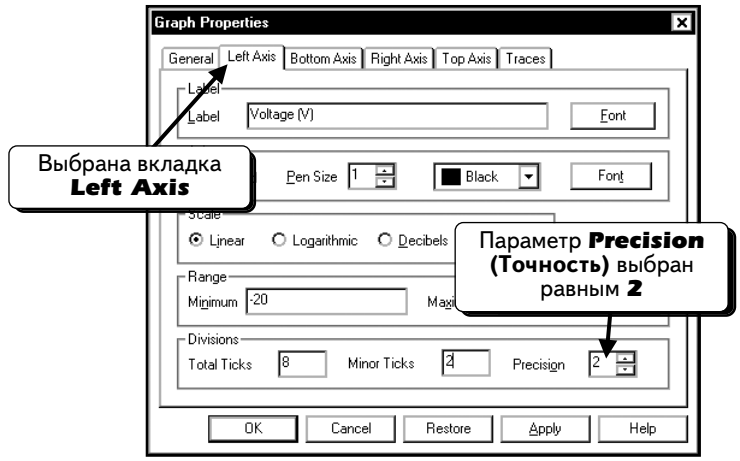
Видно, что масштаб по оси x для двух графиков совпадает, но сами оси смещены по горизонтали, так как ширина текста слева от графиков различается:



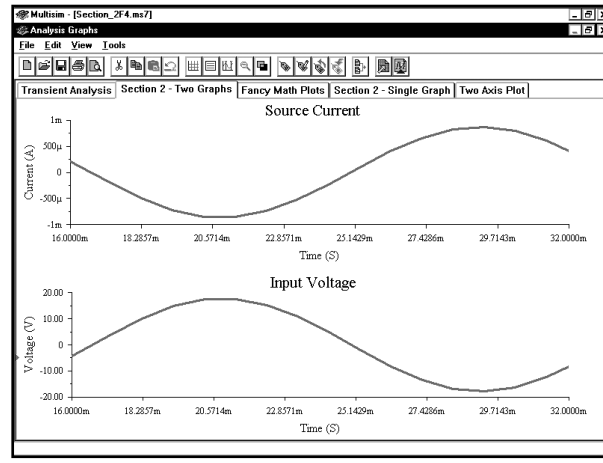
Эту проблему можно решить путем настройки точности для левых осей графиков. Откроем диалоговое окно **Graph Properties** для верхнего графика и изменим настройку точности (числа знаков после десятичной точки) для левой оси верхнего графика на **0** :



Нажмем кнопку **OK** и откроем диалоговое окно **Graph Properties** для нижнего графика. Изменим настройку точности для левой оси нижнего графика на **2** :



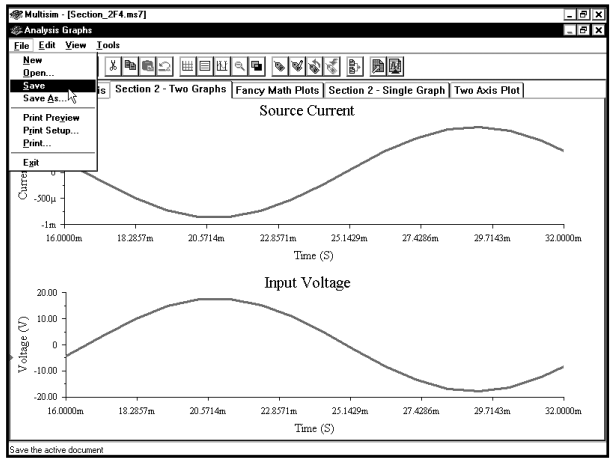
Нажмем кнопку **OK**, чтобы просмотреть изменения. Теперь оси выглядят очень похожими. Они совпадают не полностью, но очень близки друг к другу:

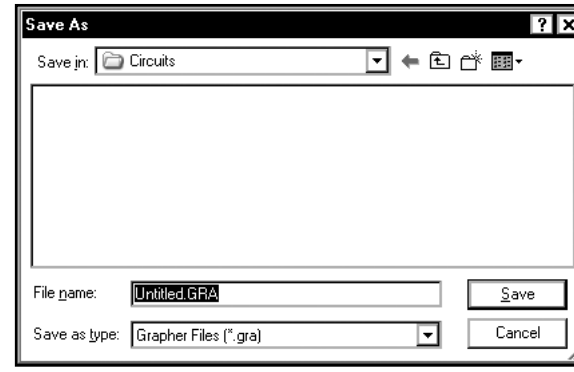


2.9. Сохранение и открытие страниц в программе Grapher

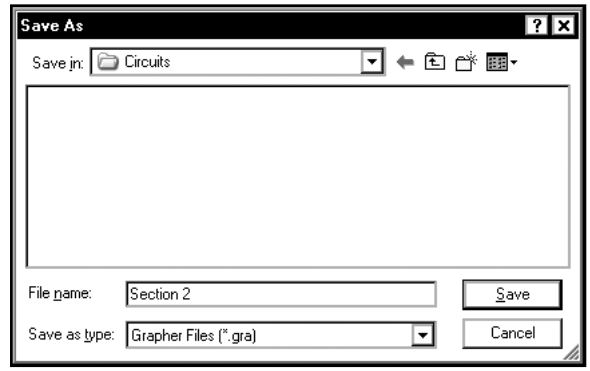
Программа Grapher позволяет сохранять и загружать графики. С помощью этой операции можно выбирать графики для сохранения. Данный метод не позволяет сохранять схемы или страницы Postprocessor — сохраняются только графики без информации о времени их создания. Благодаря этому методу можно быстро сохранить изменения, внесенные при редактировании графиков.

Чтобы сохранить графики, выберем в меню пункты **File ⇒ Save (Файл ⇒ Сохранить)**, как показано ниже:

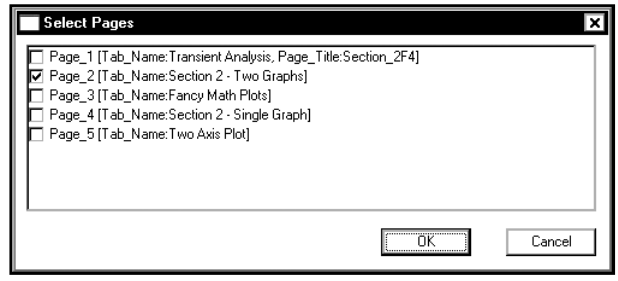




Файл Grapher будет сохранен в той же папке, что и файлы схем и программы Postprocessor. Введем имя файла:

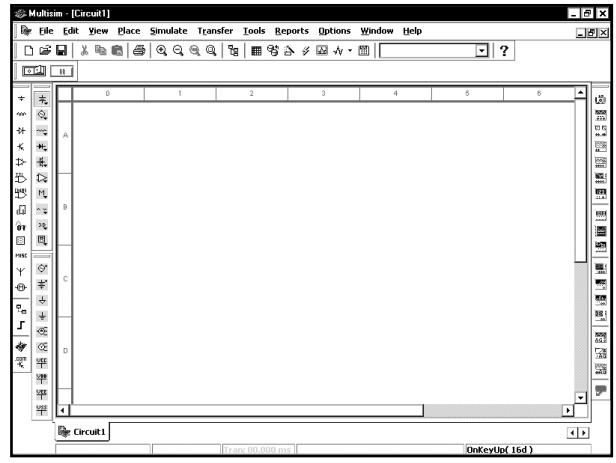


Программа Multisim автоматически добавит расширение **.gra**. Нажмем кнопку **Save**, чтобы сохранить графики:

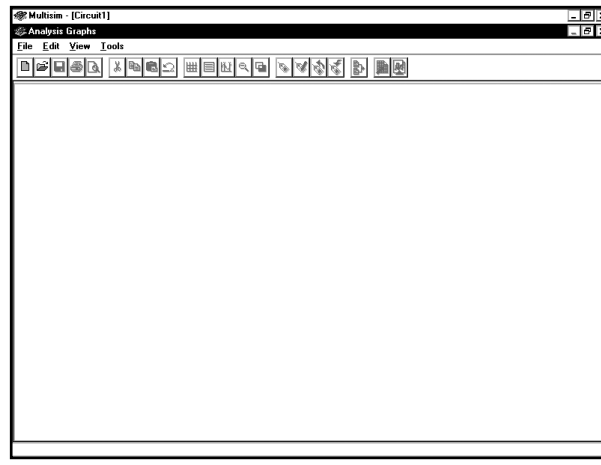


Это диалоговое окно позволяет выбирать графики для сохранения. Были выбраны все графики и нажатием кнопки **OK** сохранены.

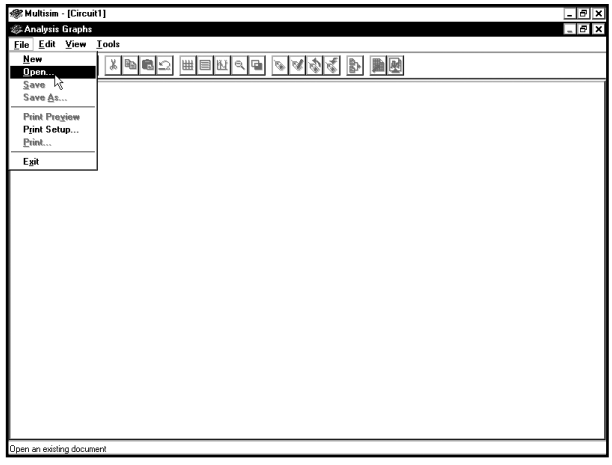
Убедимся в этом. Закроем и снова откроем программу Multisim. Увидим пустое окно новой схемы:

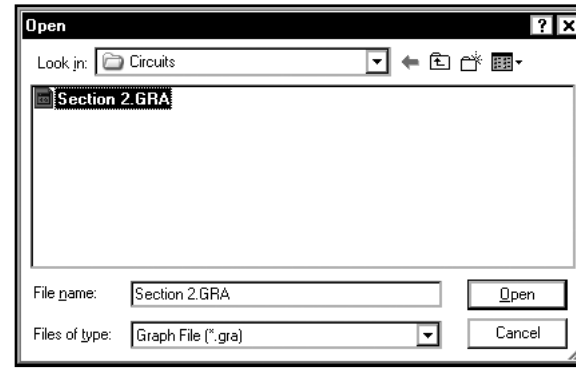


Нажмем клавиши **CTRL+G**, чтобы открыть программу Grapher. Откроется пустое окно Grapher. Развернем окно Grapher так, чтобы оно заняло все поле программы Multisim:

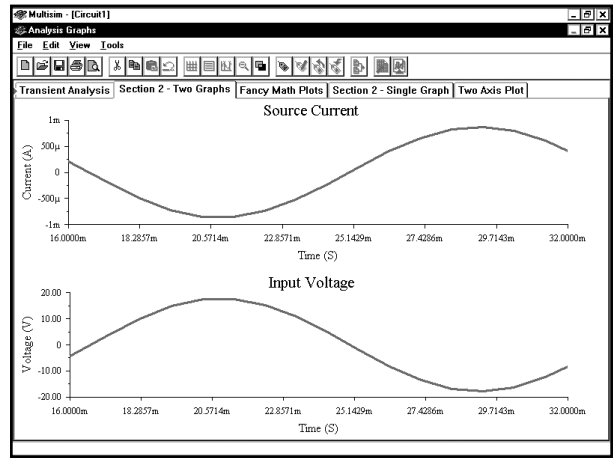


Выберем в меню пункты **File ⇒ Open (Файл ⇒ Открыть)**, выделим файл, который только что создали:

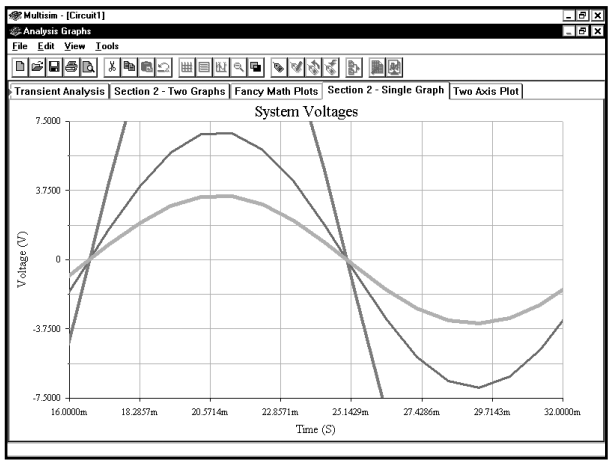


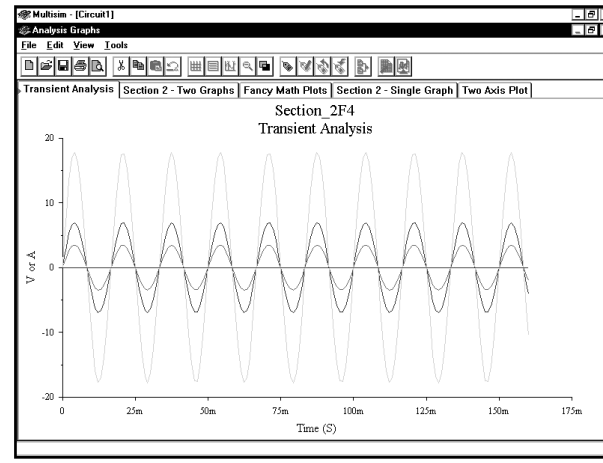


Когда нажмем кнопку **Open**, откроются страницы, которые были сохранены ранее:



Открыв другие страницы, увидим, что они содержат изменения, внесенные в программе Grapher :





В этом файле нельзя добавить ни новых кривых, ни новых страниц. Если хотим добавить дополнительные кривые для схемы, которую смоделировали, откроем файл схемы, выполним моделирование и создадим новые графики в программе Postprocessor.

2.10. Задачи

Задача 2.1. Когда настраивают моделирование Spice (например Transient Analysis), какие параметры следует указывать для того, чтобы просматривать результаты в программах Postprocessor и Grapher?

Задача 2.2. Зачем нужна кнопка **Add**?

Задача 2.3. В чем заключается отличие между такой переменной выхода, как **$vin** или **$vout**, и переменной выхода **vvx#branch**?

Задача 2.4. В чем заключается отличие между программами Grapher и Postprocessor?

Задача 2.5. В чем состоит отличие между страницей, графиком и кривой?

Задача 2.6. Выберите пять названий математических функций программы Postprocessor (таких как abs, mean и real) и опишите их математические свойства

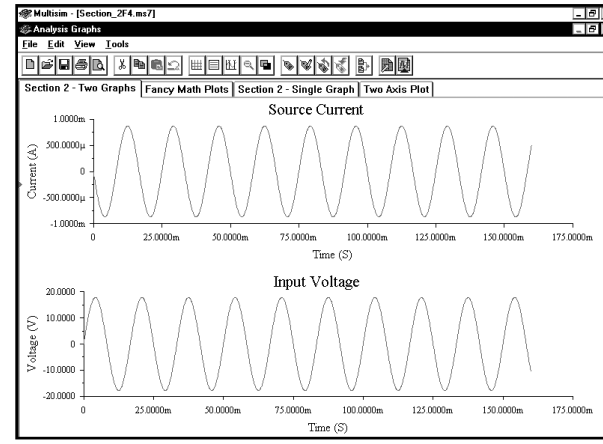
Задача 2.7. Как создать новую страницу с одним графиком?

Задача 2.8. Как добавить новую кривую на страницу с несколькими графиками?

Задача 2.9. Какие два типа файлов могут быть созданы в программе Multisim?

Задача 2.10. В каких случаях необходимо добавить в график вторую ось y?

Задача 2.11. Как определить, какой график выбран в окне Grapher? В данном руководстве об этом индикаторе не было рассказано.



Задача 2.12. Расскажите о том, как удалить страницу в окне Grapher.

Задача 2.13. Используйте схему, которая была смоделирована в главе 2. Создайте в окне Postprocessor новую страницу с тремя графиками. Отобразите на графиках мгновенные значения мощности, рассеваемой резистором Rx, с помощью уравнений: V^2/R — на верхнем графике; I^2R — на среднем графике, $V \times I$ — на нижнем графике.

Задача 2.14. Используйте схему, которая была смоделирована в главе 2. Создайте в окне Postprocessor новую страницу с одним графиком. Добавьте две кривые. Первая кривая должна показывать мгновенные значения мощности, потребляемой от источника питания, вторая кривая — сумму мгновенных значений мощностей, рассеиваемых резисторами Rx, Ry, R1 и R2. Покажите, что эти кривые совпадают.

Задача 2.15. Используйте схему, которая была смоделирована в главе 2. Создайте в окне Postprocessor новую страницу с одним графиком. Добавьте две кривые. Первая кривая должна показывать среднее значение мощности, потребляемой от источника питания, вторая — сумму средних значений мощностей, рассеиваемых резисторами Rx, Ry, R1 и R2. Покажите, что эти кривые совпадают.

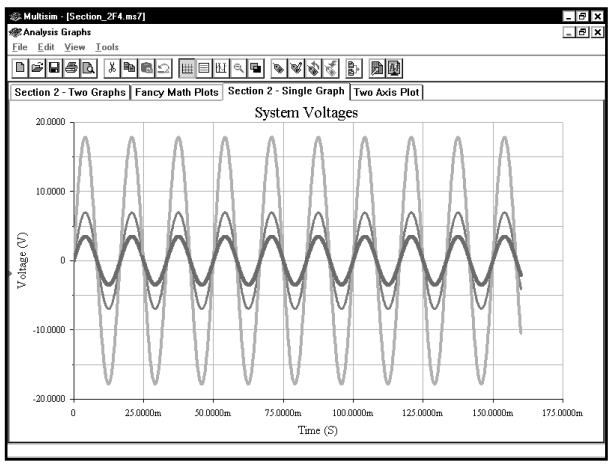
Задача 2.16. В чем заключается отличие между сохранением информации в программе Multisim и в окне Grapher?

Задача 2.17. Загрузите страницы, сохраненные в разделе 2.5. На странице с тремя графиками добавьте сетку для всех графиков, а также легенду, но только для двух верхних графиков. Распечатайте ваше решение.

Задача 2.18. На странице Grapher с тремя графиками замените у среднего графика — заголовок на «**My Middle Graph**», у верхнего — ярлыки осей: у оси y — на «**Strawberries**», а у оси x — на «**Time — Warp**». Распечатайте ваше решение.

Задача 2.19. В чем заключается отличие между использованием кнопок **OK** и **Apply** в диалоговом окне **Graph Properties** программы Grapher?

Решение задач 2.20—2.24 начните с построения графика:



Задача 2.20. Измените сетку графика таким образом, чтобы толщина сетки составляла **2**, а цвет сетки был **красным**. Распечатайте решение.

Задача 2.21. Измените левую ось графика таким образом, чтобы толщина оси составляла **2**, а цвет был **синим**. Распечатайте решение.

Задача 2.22. Измените левую ось графика таким образом, чтобы общее количество делений составляло **16**, а количество делений низшего уровня составляло **4**. Распечатайте решение.

Задача 2.23. Измените нижнюю ось графика таким образом, чтобы толщина оси составляла **3**, а цвет был **зеленым**. Распечатайте решение.

Задача 2.24. Измените нижнюю ось графика таким образом, чтобы общее количество делений составляло **14**, а количество малых делений составляло **2**. Распечатайте решение.

Задача 2.25. Какое максимальное количество графиков можно добавить на одну страницу в программе Postprocessor? Какое максимальное количество графиков можно добавить на страницу в программе Postprocessor, чтобы по-прежнему печатать страницу без проблем? Создайте и распечатайте такую страницу.

Задача 2.26. Расскажите о трех методах отображения и скрытия курсоров на странице Grapher.

Задача 2.27. Расскажите о трех методах отображения и скрытия сетки на странице Grapher.

Задача 2.28. Расскажите о трех методах отображения и скрытия легенды на странице Grapher.

Задача 2.29. Расскажите о трех методах отображения диалогового окна Graph Properties.

Задача 2.30. Расскажите о двух методах увеличения масштаба на странице Grapher.

Задача 2.31. Расскажите о двух способах сохранения файлов и информации в программе Multisim.

Задача 2.32. В чем заключаются преимущества и недостатки двух различных методик изменения масштаба, которые описаны в разделе 2.8?

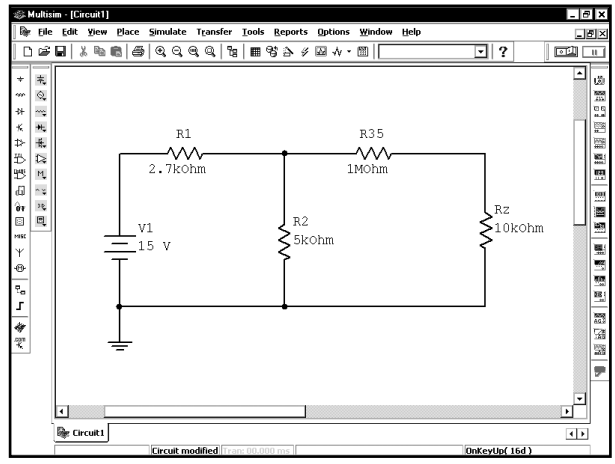
ГЛАВА 3

Измерения на постоянном токе

В этой главе будем определять значения токов и напряжений в схеме. Каждый сеанс моделирования* в данной главе проводится только для одного значения источника постоянного напряжения. В главе 4 будет рассмотрена функция **DC Sweep Analysis**, которая позволяет варьировать значения напряжения в процессе одного сеанса. В главах 3 и 4 используются модели для постоянных сигналов. При работе с функцией **DC Sweep** анализ проводится для ряда значений постоянного сигнала. Например, можно построить график, который показывает изменения тока транзистора при различных значениях напряжения источника DC. В этой же главе, чтобы определить значение при изменении напряжения источника DC, придется внести изменения, а потом повторить моделирование. Будет рассказано о нескольких способах отображения результатов с помощью индикаторов, прибора **Multimeter (мультиметр)**, а также с помощью анализа **DC Operating Point Analysis**.

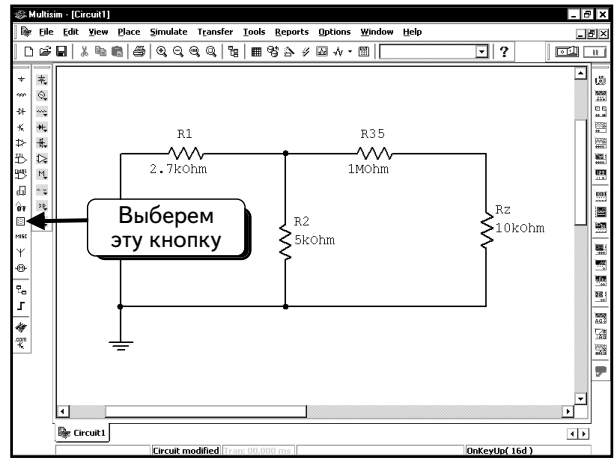
3.1. Схемы с резисторами

Выполним моделирование следующей схемы:



3.1.1. Измерения с использованием индикаторов

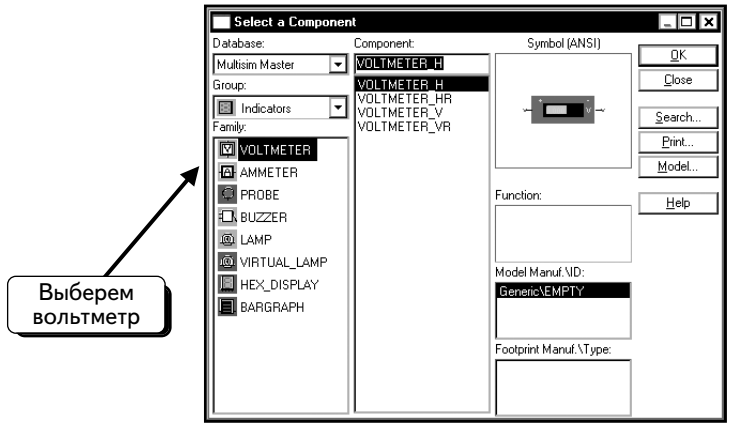
Сначала определим ток источника **V1**, а также напряжение на резисторах **R2** и **Rz**. Чтобы измерить ток и напряжение, будем использовать индикаторы тока и напряжения. Щелкнем по кнопке **Indicator (Индикатор)**:



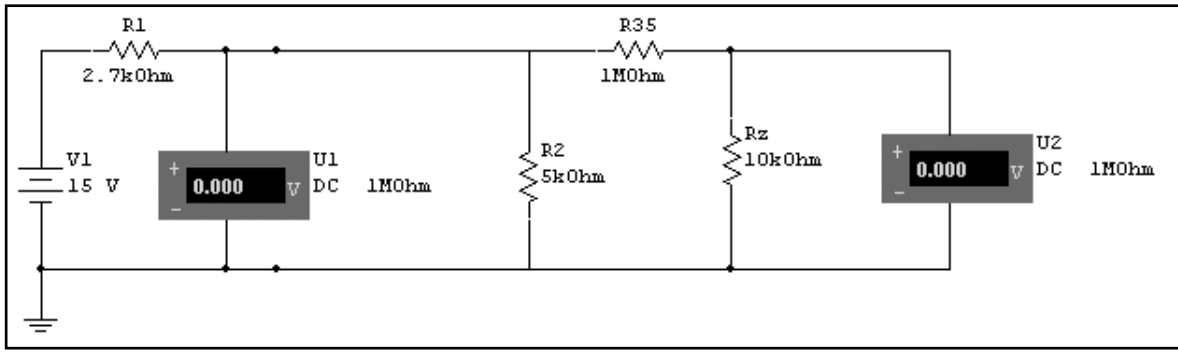
Откроется список, включающий несколько индикаторов напряжения:

---

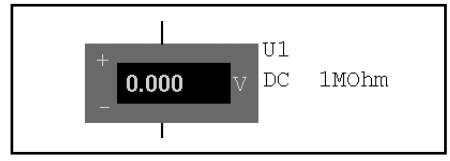
* Сеансом моделирования будем называть процесс, который начинается командой ***Run (Выполнить)*** (*Прим. ред.*).



Все индикаторы напряжения выполняют одну и ту же функцию, но имеют различно расположенные полюса, что упрощает их подключение в конкретных схемах. Выберем тип индикатора, добавим в схему два индикатора и подсоединим их так, как показано ниже. Обратите внимание: напряжение измеряется между двумя узлами схемы:

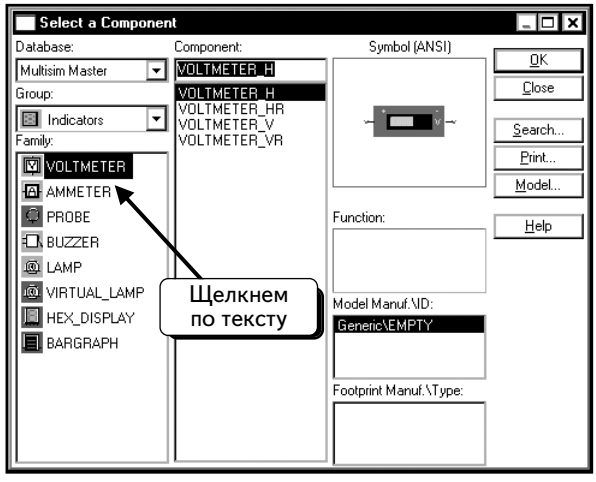


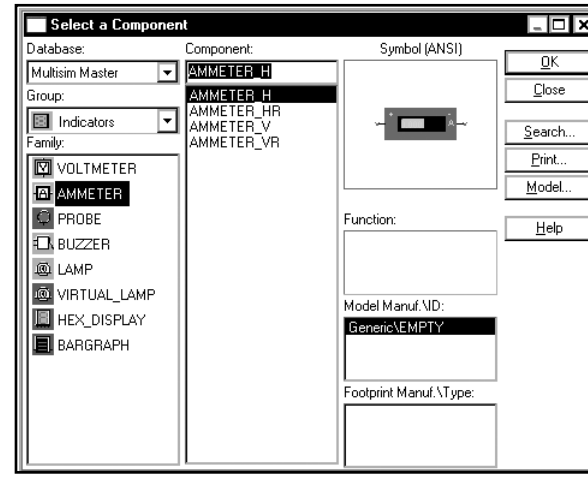
Рядом с индикаторами напряжения указано значение сопротивления.



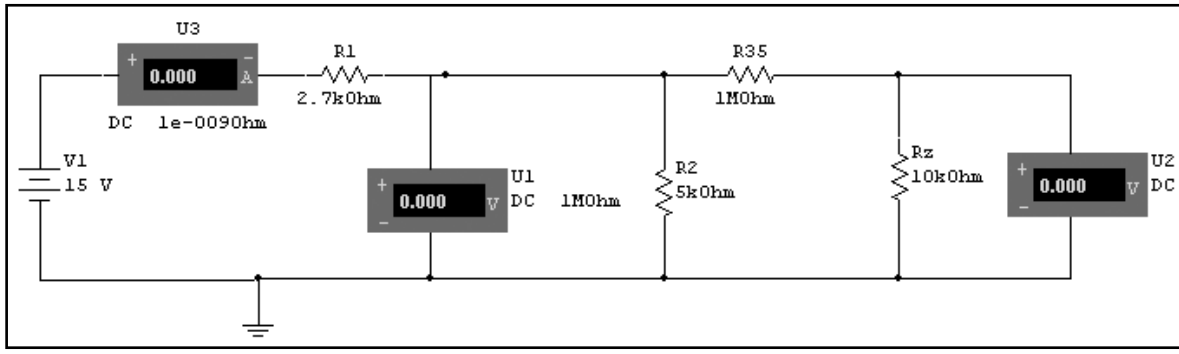
Это — параллельное сопротивление индикатора, о котором будет рассказано позднее. По умолчанию сопротивление равно 1 МОм.

Чтобы добавить индикатор тока, нажмем кнопку **Indicator** . Появится такое же диалоговое окно, как и при добавлении индикатора напряжения; сейчас нужно выбрать измеритель тока. Нажмем кнопку **AMMETER (Амперметр)**,

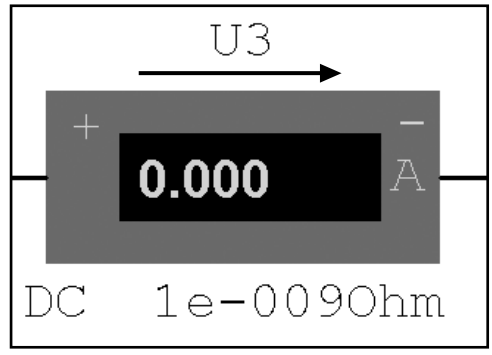




Индикатор тока должен быть включен последовательно с компонентом, через который будет измеряться ток. Выберем измеритель тока и включим его в схему так, как показано:

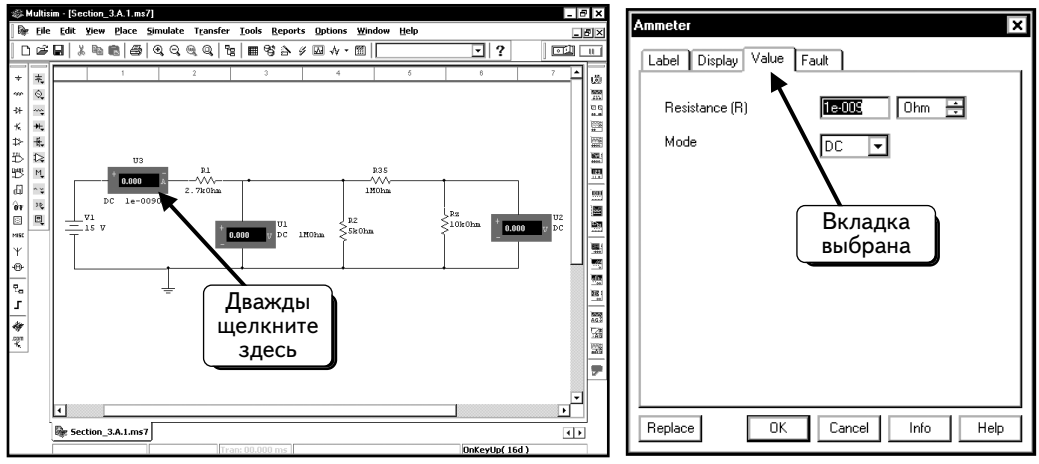


Важно понять, что обозначают символы «плюс» и «минус» на индикаторе тока. Если ток входит в «плюс» и выходит из «минуса», на экране отобразится положительное значение. Таким образом, при движении тока в направлении, показанном стрелкой, индикатор тока покажет положительное значение:



В данной схеме индикатор тока будет измерять ток источника V1 или ток, проходящий через резистор R1 (что то же самое). Под индикатором тока показано значение сопротивления. Это последовательное сопротивление индикатора, о котором будет рассказано позднее.

Перед тем, как моделировать схему, рассмотрим индикаторы тока и напряжения более подробно. Дважды щелкнем по индикатору тока. Откроется диалоговое окно настройки параметров:



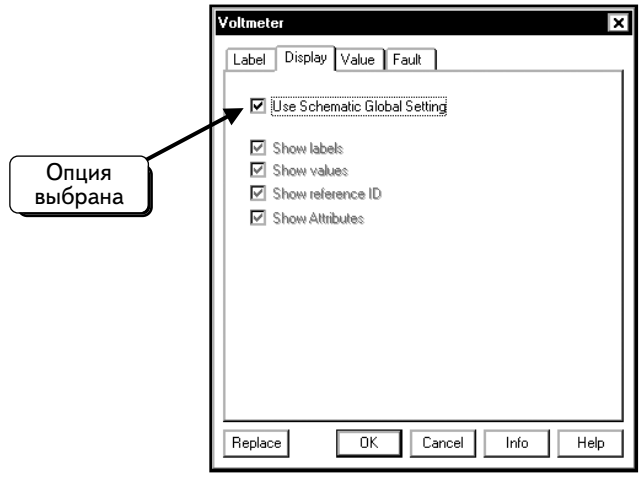
Если вкладка **Value** (**Значение**) не выбрана, щелкнем по ней.

Это окно содержит два важных параметра. Первый параметр, **Mode (Режим),** настроен на режим измерения постоянного тока **DC**. Это значит, что индикатор отображает постоянное или среднее значение измеряемого тока. Так как все источники питания в этой схеме являются источниками постоянного тока, эту настройку менять

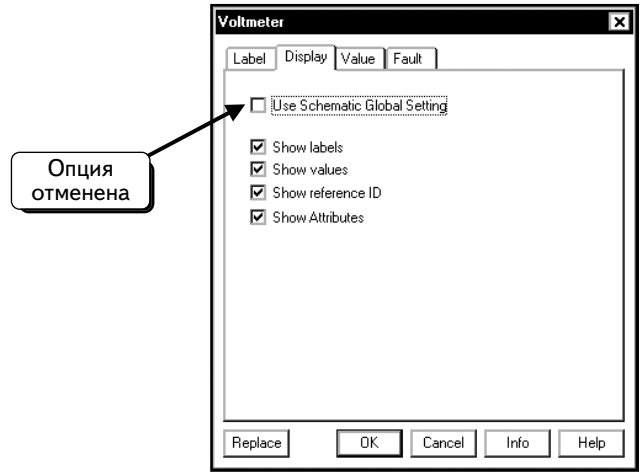
не нужно. Другой параметр соответствует последовательному сопротивлению индикатора тока. Все реальные измерители тока включаются последовательно с компонентами, через которые они измеряют ток (последовательное сопротивление измерителей, как правило, невелико). Так как индикатор последовательно соединяется с другими элементами схемы, его сопротивление будет добавляться к общему сопротивлению ветви. Чтобы уменьшить этот эффект, последовательное сопротивление должно быть небольшим. Программа Multisim позволяет задавать значение последовательного сопротивления.

Существуют два способа настройки. В первом при сравнении модели с настоящей схемой (в которой ток измеряется с помощью амперметра) следует задать для модели сопротивление, равное сопротивлению реального амперметра. В технических данных амперметра можно найти значение его внутреннего сопротивления. В результате модель будет настроена точно . Если амперметр оказывает на схему определенное влияние, оно будет присутствовать и в вашей модели. Второй способ заключается в том, чтобы выбрать для последовательного сопротивления небольшое значение, которое не влияет на работу схемы. По умолчанию используется значение 1 нОм **(1e-009 Ohm)**. Такое сопротивление очень мало по сравнению с общим сопротивлением схемы, следовательно, сопротивление индикатора тока практически не будет влиять на схему. Мы не собираемся сравнивать нашу схему с настоящей, поэтому сохраним значение по умолчанию в 1 нОм.

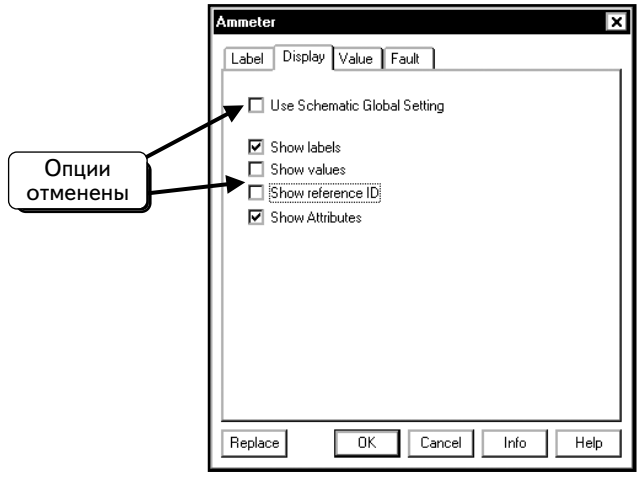
В схеме отображены параметры **Mode (DC)** и сопротивление **Resistance (1e-009Ohm)**. Возможно, они не понадобятся, в таком случае, их можно скрыть. Щелкнем по вкладке **Display (Отобразить)**. Обратите внимание на то, что выбрана опция **Use Schematic Global Setting (Использовать общие настройки схемы)**:



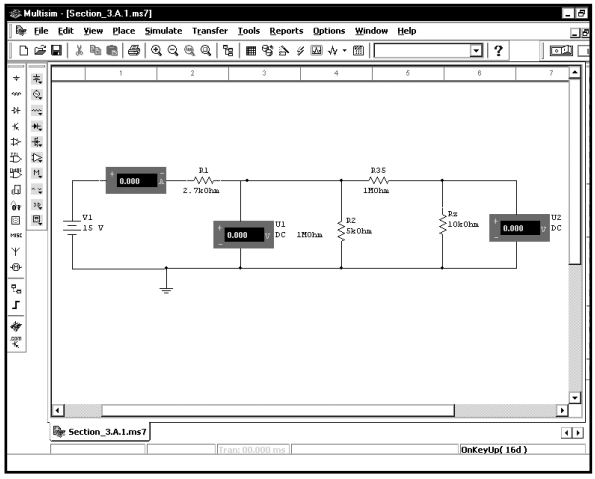
Благодаря этому для каждого компонента отображаются четыре категории информации, которые выбраны в диалоговом окне. Чтобы скрыть эту информацию, отключим опцию **Use Schematic Global Setting** :

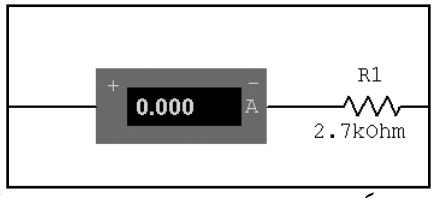


Амперметр не имеет ярлыков или атрибутов, которые показывались бы на экране. Для амперметра используется название **U3**. Режим и сопротивление отображаются в виде значений. Если мы отключим опции **Show values (Показывать значения)** и **Show reference ID (Показывать номер)**, соответствующая информация не будет отображаться на схеме:

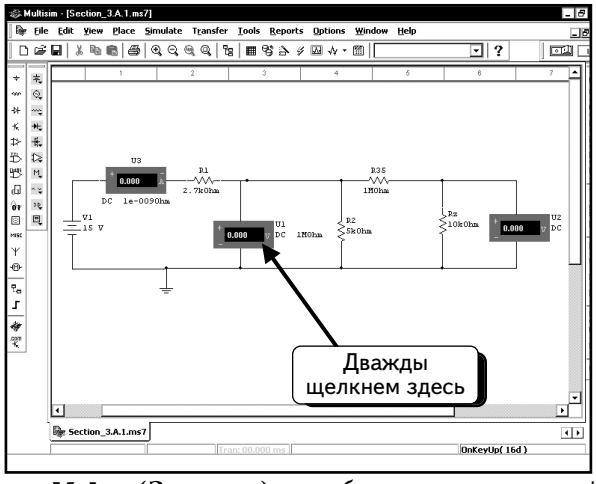


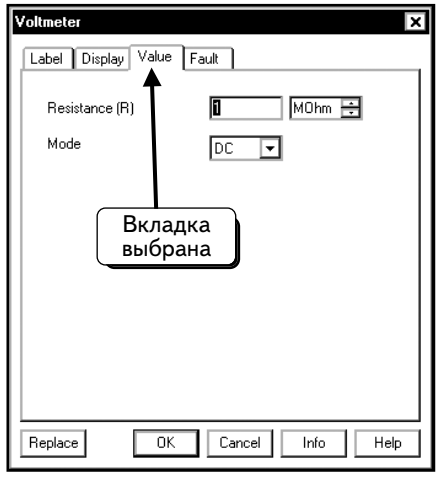
Нажмем кнопку **OK**, чтобы закрыть диалоговое окно. Увидим, что название режим **DC (U3)** и сопротивление **(1e-009 Ohm)** амперметра больше не показываются на схеме:





Рассмотрим теперь параметры индикатора напряжения. Дважды щелкнем по этому прибору. Откроется диалоговое окно настройки параметров:

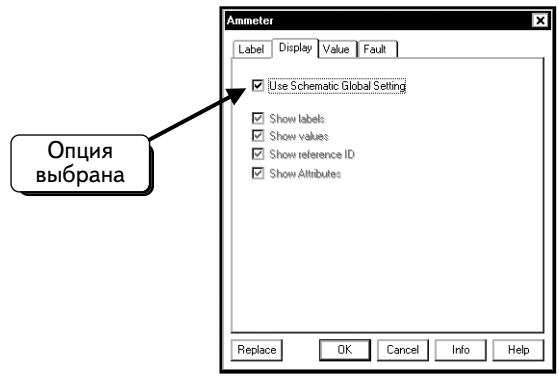




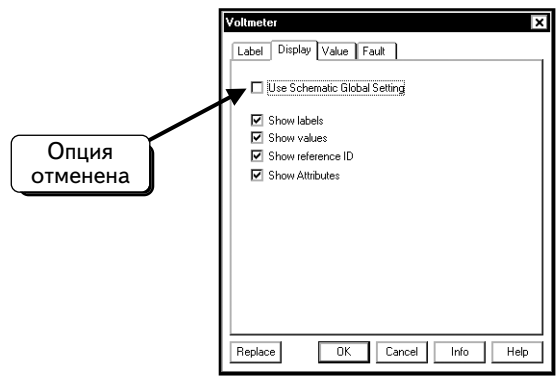
Если вкладка **Value (Значение)** не выбрана, щелкнем по ней.

Как и при работе с индикатором тока, можно настроить прибор на измерение напряжения переменного или постоянного тока. Мы сохраним для параметра **Mode** значение **DC**. Другой важный параметр — это параллельное сопротивление индикатора напряжения. Реальные вольтметры подключаются параллельно элементам, напряжение на которых они должны измерить. Чтобы измерить напряжение, измеритель должен пропустить небольшой ток от узлов, к которым он подключен. Этот дополнительный ток моделируется подключением внутреннего сопротивления измерителя. Так как индикатор напряжения подключен между двумя узлами, сопротивление индикатора будет уменьшать ток в ветвях схемы, подключенных к этим узлам, и тем самым воздействовать на схему. Чтобы снизить это влияние, необходимо использовать вольтметры с большим внутренним сопротивлением. Программа Multisim позволяет задать значение этого сопротивления. По умолчанию используется значение 1 МОм. Если ток, ответвляемый на измеритель, мал по сравнению с током других элементов схемы, влияние будет незначительным. Если сопротивление измерителя сравнимо с сопротивлениями других элементов схемы, он может оказать существенное воздействие на процессы в схеме, и результаты измерения будут неточными. Допустим, что значение 1 МОм является оптимальным, и не будем его изменять. Впоследствии проверим, не допустили ли мы ошибку.

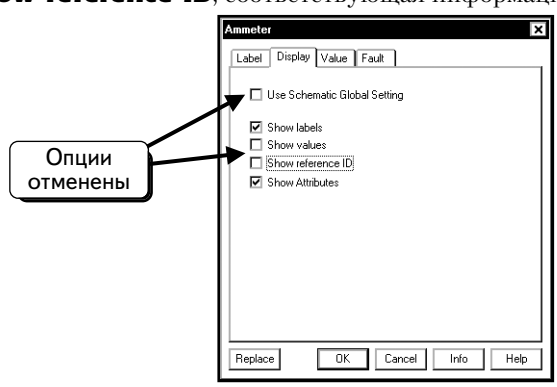
В схеме отображены параметры **Mode (DC)** и сопротивление **Resistance (1 MOhm)**. Если эти атрибуты не нужны, можно их скрыть. Щелкнем по вкладке **Display**. Обратите внимание на то, что выбрана опция **Use Schematic Global Setting**:



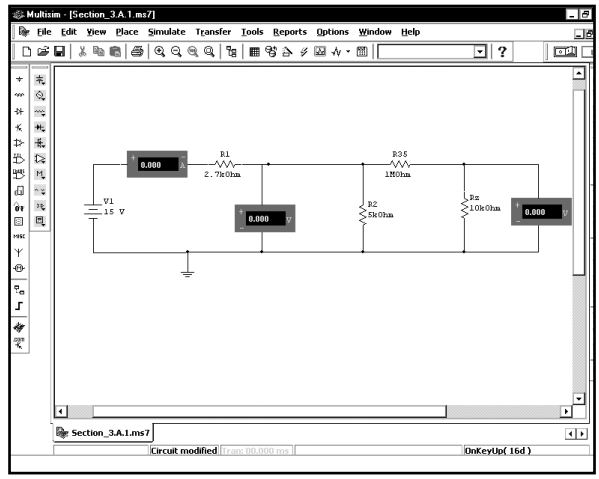
Благодаря этому для каждого компонента отображаются четыре категории информации, которые выбраны в диалоговом окне. Чтобы скрыть информацию, отключим опцию **Use Schematic Global Setting**:

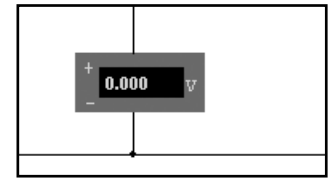


Компонент не имеет ярлыков или атрибутов, которые могли бы быть показаны на экране. Для вольтметра используется название «U1». И режим, и сопротивление отображаются с помощью опции **Show values**. Если отключить опции **Show values** и **Show reference ID**, соответствующая информация не будет отображаться на схеме:

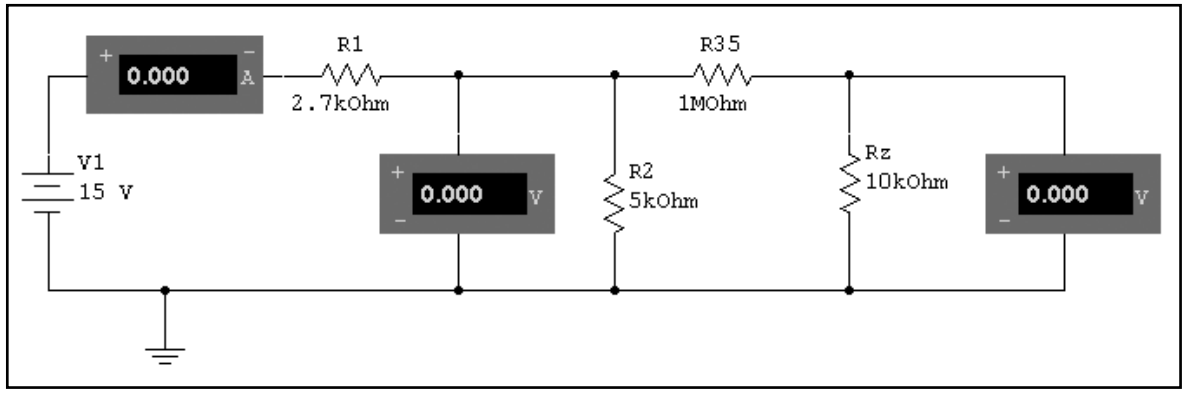


Нажмем кнопку **OK**, чтобы закрыть диалоговое окно, и увидим, что название (**U1**), режим (**DC**) и сопротивление (**1 МОм**) вольтметра больше не появляются на схеме:

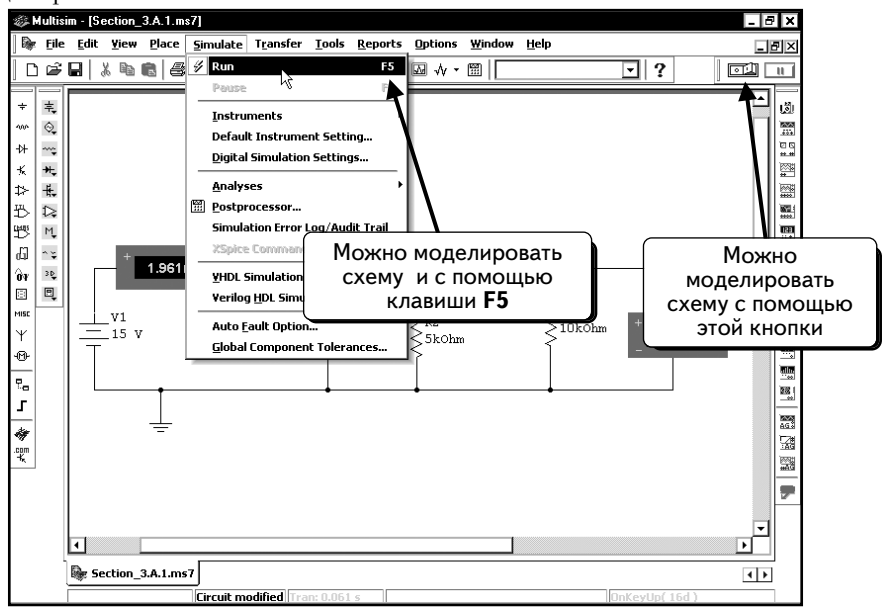




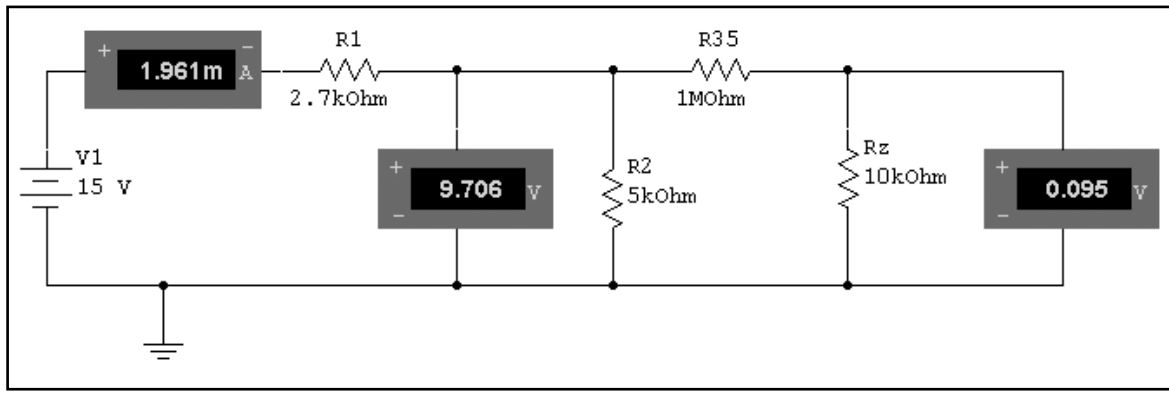
Удаление информации с экрана позволяет немного «разгрузить» схему и увеличить ее. Увеличенная схема приведена ниже:



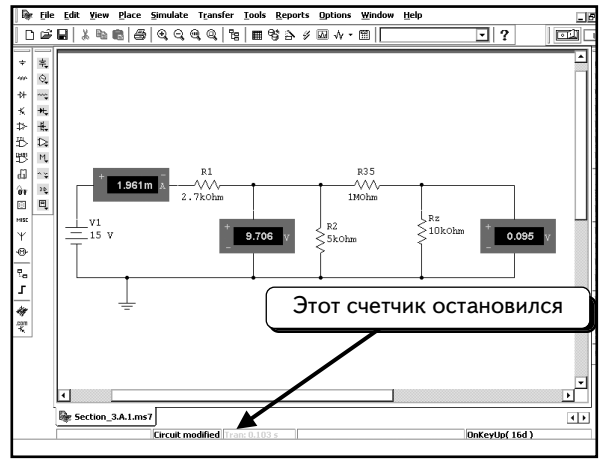
Все подготовлено для моделирования схемы. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Run (Моделировать ⇒ Выполнить)**, нажмем клавишу **F5**, кнопку **Run/stop simulation** **(Выполнить/остановить моделирование)** или кнопку моделирования  :



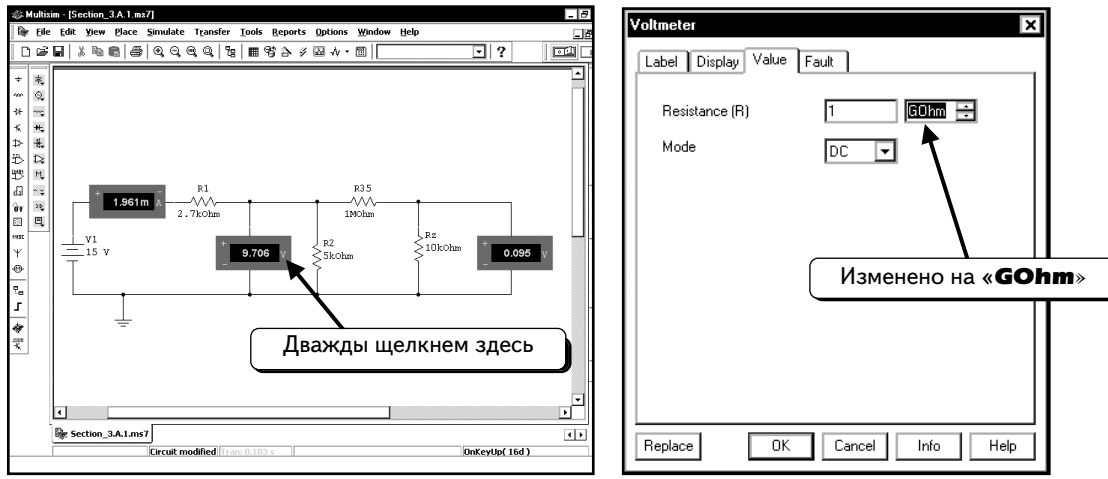
Во время моделирования схемы индикаторы отобразят соответствующие значения:



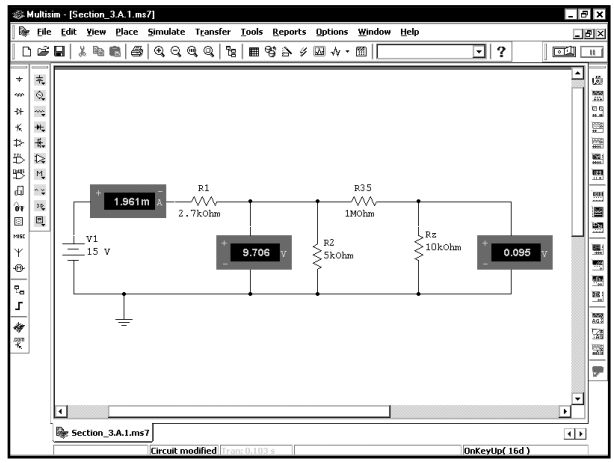
Проверим, влияет ли сопротивление индикаторов напряжения на полученные значения. Сначала остановим моделирование. Для этого выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Run**, нажмем клавишу **F5**, кнопку ***Run/stop simulation*** или кнопку моделирования . Индикатор времени внизу экрана прекратил отсчет; это значит, что моделирование остановлено:



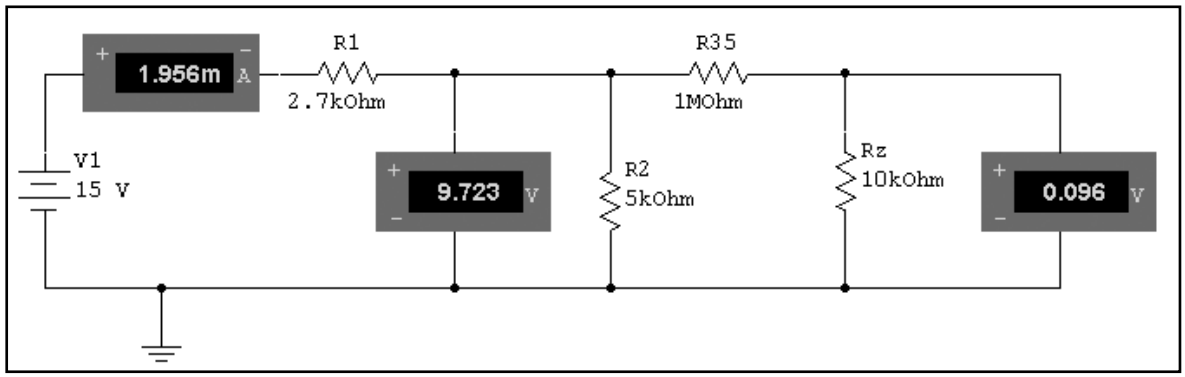
Дважды щелкнем по индикатору напряжения и выберем вкладку **Value**. Изменим, как показано, сопротивление на 1 ГОм (1×10^9 Ом):



Это очень большое сопротивление по сравнению с сопротивлениями других элементов схемы, и его должно быть достаточно для того, чтобы минимизировать влияние индикатора напряжения. Нажмем кнопку **OK**, чтобы закрыть диалоговое окно. Изменим сопротивление и второго индикатора напряжения на 1 ГОм. После этого схема будет выглядеть так же, как раньше:

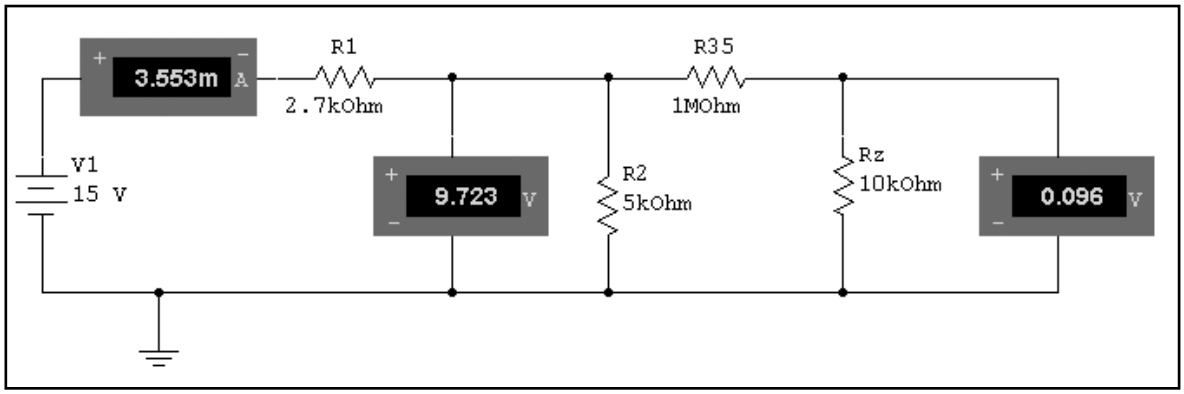


Значения на табло индикаторов не изменятся до тех пор, пока не будет выполнено моделирование. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Run**, нажмем клавишу **F5**, кнопку ***Run/stop simulation***  или кнопку моделирования  . Через несколько секунд значения индикаторов изменятся:



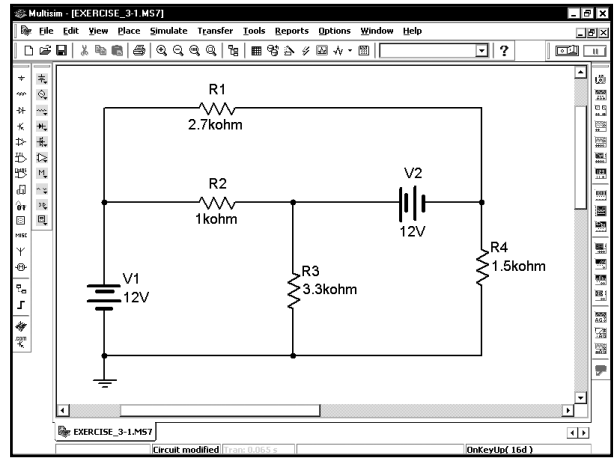
Как видим, показания всех индикаторов немного изменились. Сейчас они показывают значения 1,956 мА, 9,723 и 0,096 В. Изначально индикаторы показывали 1,961 мА, 9,706 и 0,095 В. Изменения могут быть как существенными, так и незначительными (это зависит от вашей схемы). Помните о том, что операция измерения может повлиять на его результат. Программа Multisim позволяет моделировать подобные эффекты с помощью последовательного сопротивления индикатора тока и параллельного сопротивления индикатора напряжения. Изначально значение силы тока было равно 1,954 мА; таким образом, очевидно, что измерители даже с высоким сопротивлением несколько изменяют ток схемы.

Идеальный индикатор тока не имеет последовательного сопротивления, а идеальный индикатор напряжения — параллельного сопротивления. Если задать слишком низкое значение сопротивления индикатора тока, он не сможет правильно измерять значение тока. Ниже показан результат, который был получен после настройки сопротивления индикатора тока на 10^{-12} Ом:

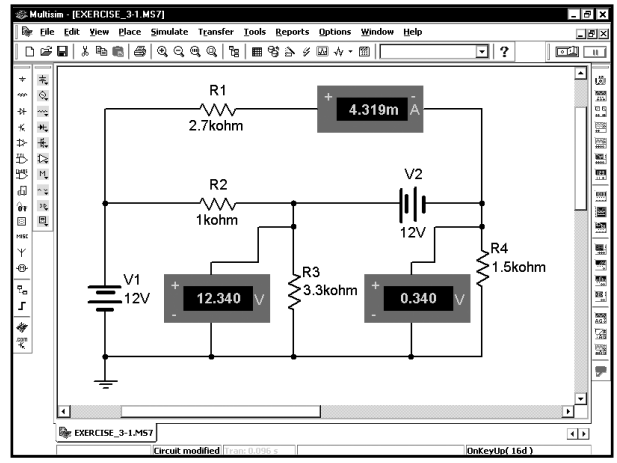


Индикатор отображает неверное значение силы тока (3,553 мА). На этом примере показано, что нельзя задавать слишком низкое значение сопротивления индикатора. Обратите внимание: значение 1 нОм для последовательного сопротивления индикатора тока идеально подходит для данной схемы, а значение 1 МОм для параллельного сопротивления индикатора напряжения слишком мало. Увеличим параллельное сопротивление индикатора напряжения до 1 ГОм, чтобы минимизировать воздействие его на схему.

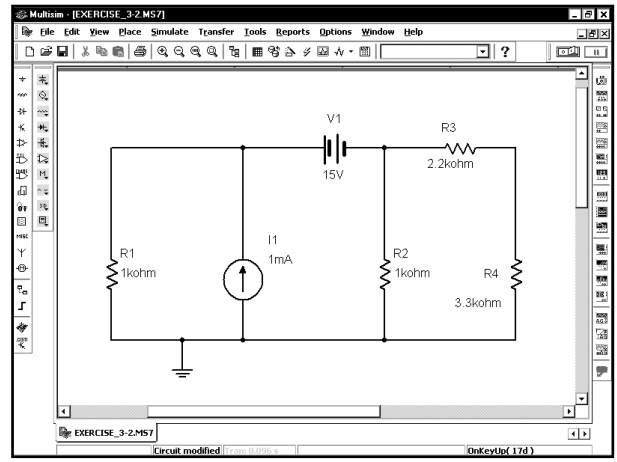
УПРАЖНЕНИЕ 3-1: Определите напряжения на узлах и силу тока через резистор R1:



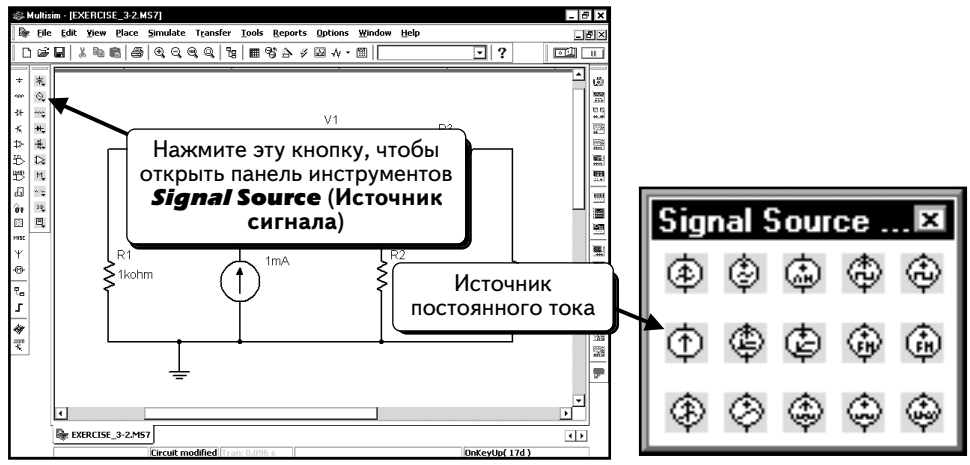
РЕШЕНИЕ: Включите в схему индикаторы напряжения и тока. Выполните моделирование:



УПРАЖНЕНИЕ 3-2: Определите напряжения на узлах схемы и ток через резистор R1:

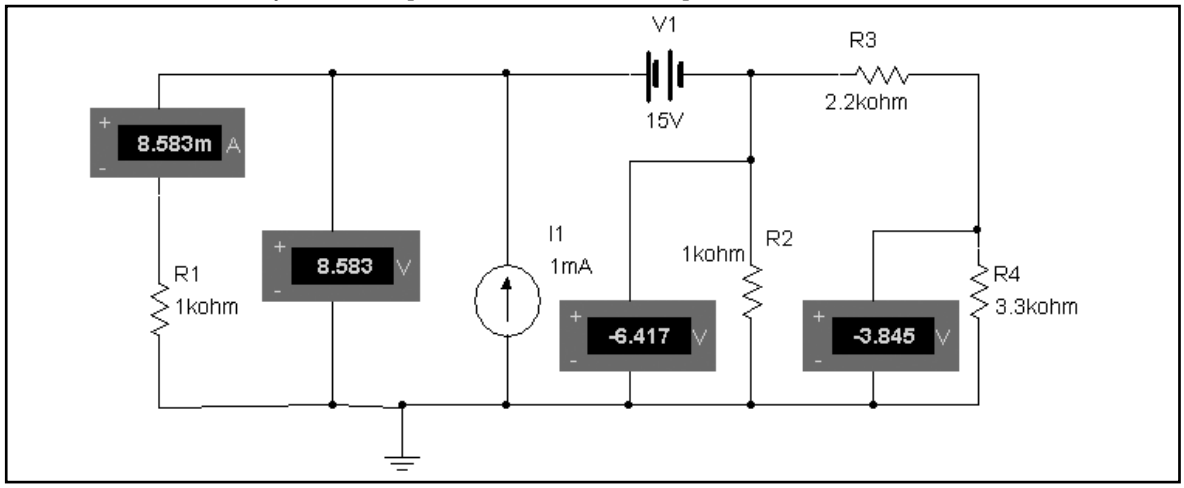


ПОДСКАЗКА: Источник тока DC расположен на панели инструментов **Signal Source (Источники сигнала):**



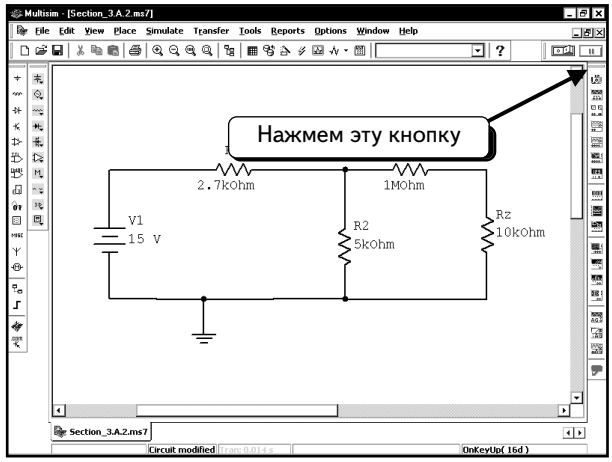
Нажмите кнопку, чтобы добавить источник тока DC.

РЕШЕНИЕ: Включите в схему индикаторы и выполните моделирование:

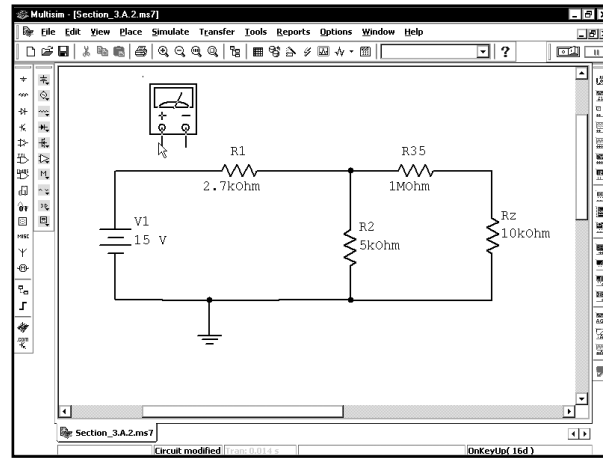


3.1.2. Измерения с помощью мультиметра

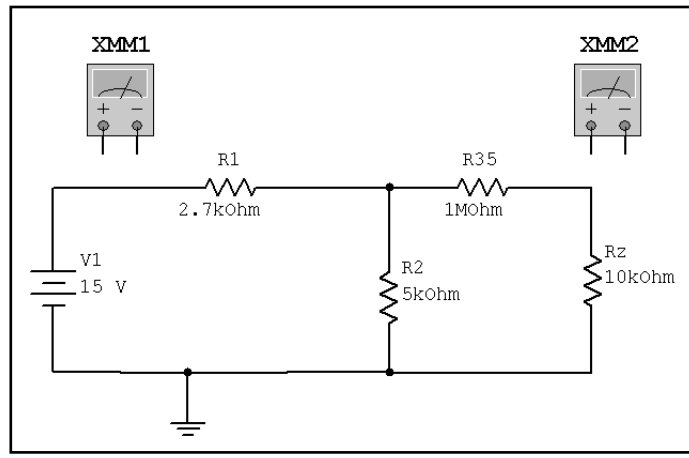
Измерять напряжение и ток можно также с помощью прибора **Multimeter (Мультиметр)**. Будем работать с прежней схемой, которую повторим ниже:



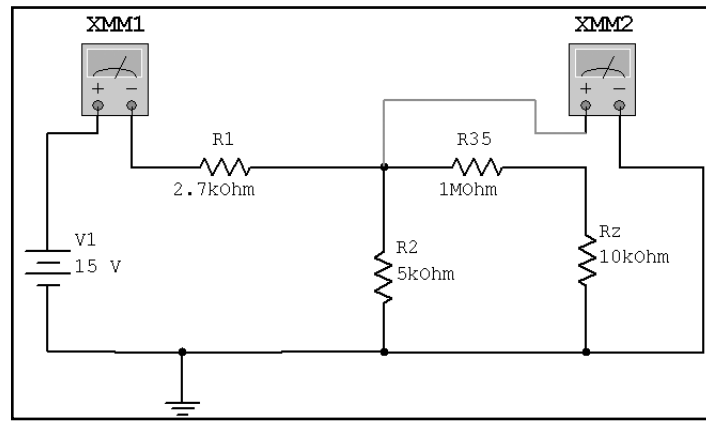
Чтобы добавить мультиметр, нажмем кнопку **Multimeter**  . Мультиметр будет «привязан» к курсору мыши:



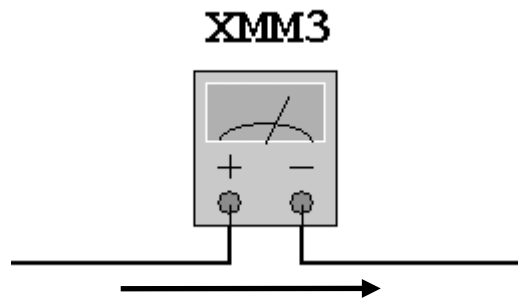
Поместим мультиметр в схему так же, как и любой другой компонент. Будем измерять напряжение и ток, следовательно, необходимо добавить два устройства:



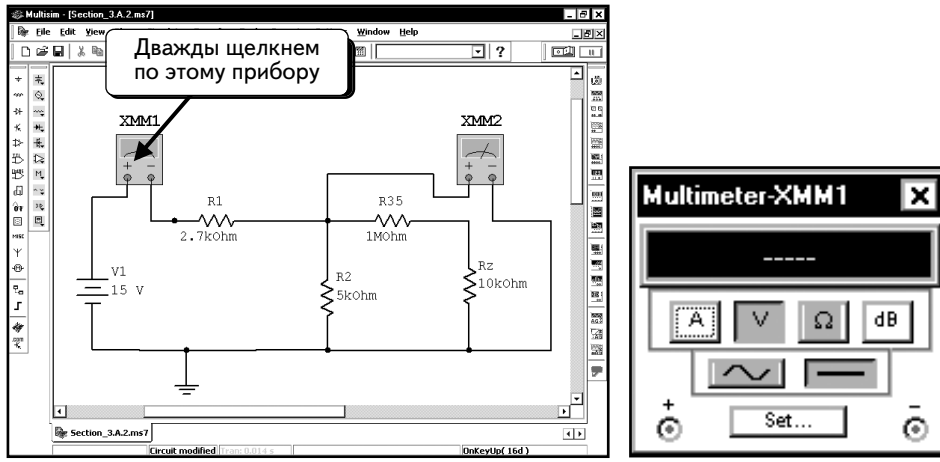
Ток через резистор **R1** будет измеряться с помощью устройства **XMM1**, а напряжение на резисторе **R2** — с помощью устройства **XMM2**. Измеритель тока, следует включить последовательно с компонентом, через который будет измеряться ток. При измерении напряжения мультиметр подсоединяется параллельно компоненту, на котором будет измеряться ток напряжение. Подключим устройства так, как показано:



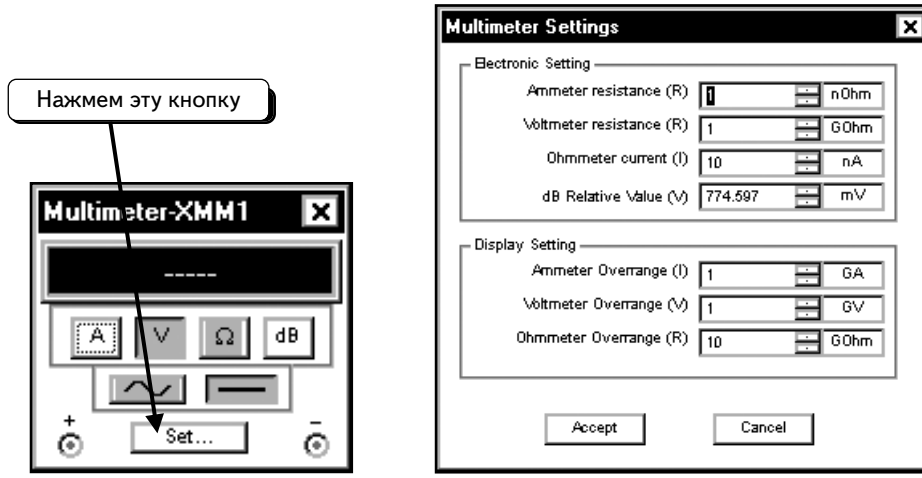
Следует понимать, что обозначают символы «плюс» и «минус» на мультиметре. Если ток входит в «плюс» и выходит из «минуса», на экране отобразится положительное значение. Таким образом, при движении тока в направлении, показанном ниже, индикатор тока покажет положительное значение:



Чтобы просмотреть функции устройства, дважды щелкнем по нему. Откроется окно с информацией:



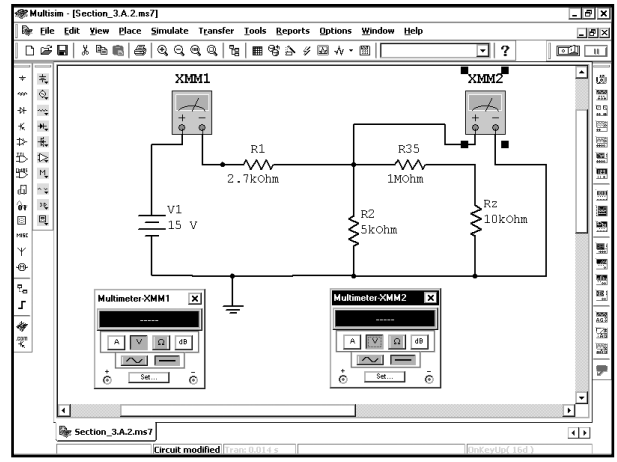
Как видим, с помощью данного устройства можно измерять ток, напряжение, сопротивление и уровень напряжения в децибелах, можно также выбрать режим AC или DC. На монохромном экране не просто различить, какой режим был выбран. Кнопка **Set (Настроить)** на устройстве позволяет отобразить параметры этого устройства:



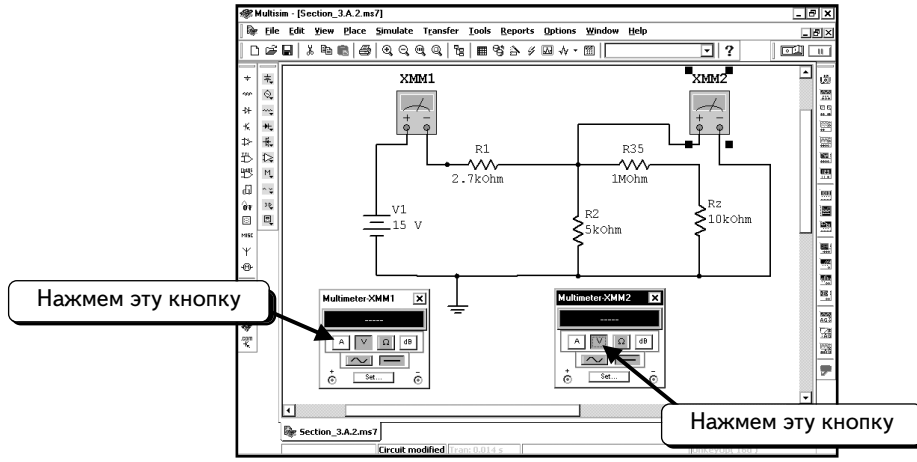
Данные компоненты модели схожи с индикаторами напряжения и тока (см. с. 125). Устройство имеет сопротивление 1 нОм, если измеряет ток, и 1 ГОм, если измеряет напряжение. Устройство при измерении сопротивления пропускает ток 10 нА через подключенный компонент, а затем считывает напряжение на этом компоненте. Устройства работают практически без проблем, поэтому не требуется изменять настройки по сопротивлению. Если последовательное сопротивление в 1 нОм или параллельное сопротивление в 1 ГОм существенно влияет на схему, следует учесть это во время анализа. В нижней части окна можно указать параметры ошибки для устройства. Если текущее значение будет

выходить из указанного диапазона, мультиметр отобразит сообщение об ошибке. Нажмем кнопку **Accept (Принять)**, чтобы закрыть диалоговое окно **Multimeter Settings (Настройки мультиметра)**.

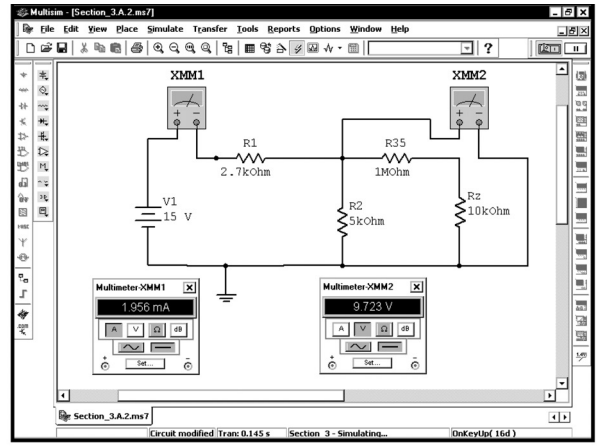
Дважды щелкнем по другому мультиметру, чтобы открыть окно. У нас откроются оба мультиметра:



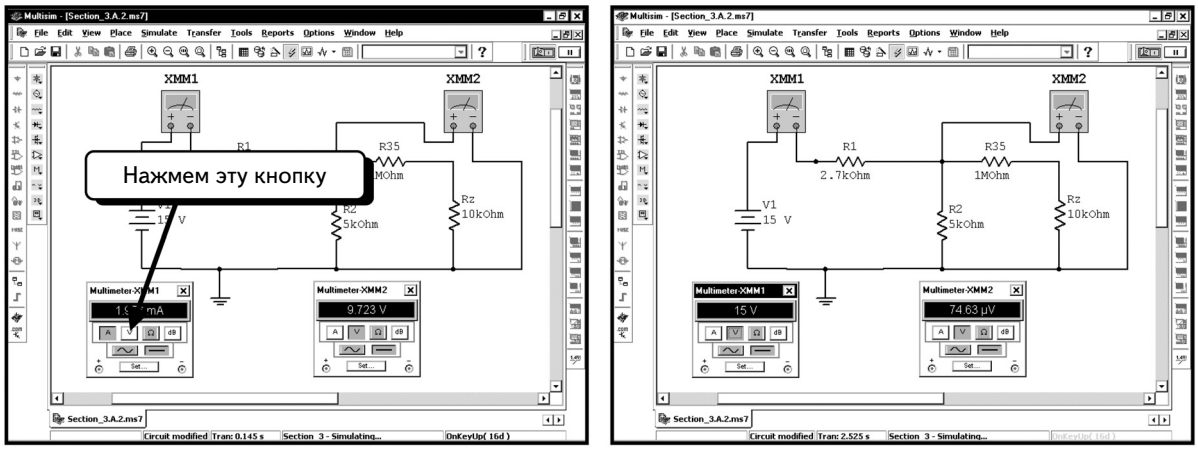
Настроим правый мультиметр на измерение напряжения, нажав кнопку **V** [V] , а левый мультиметр — на измерение тока, нажав кнопку **A** [A] :



Мы готовы к моделированию. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Run**, нажмем клавишу **F5**, кнопку **Run/stop simulation** или кнопку моделирования [▶] . Мультиметры отобразят измеренные значения:

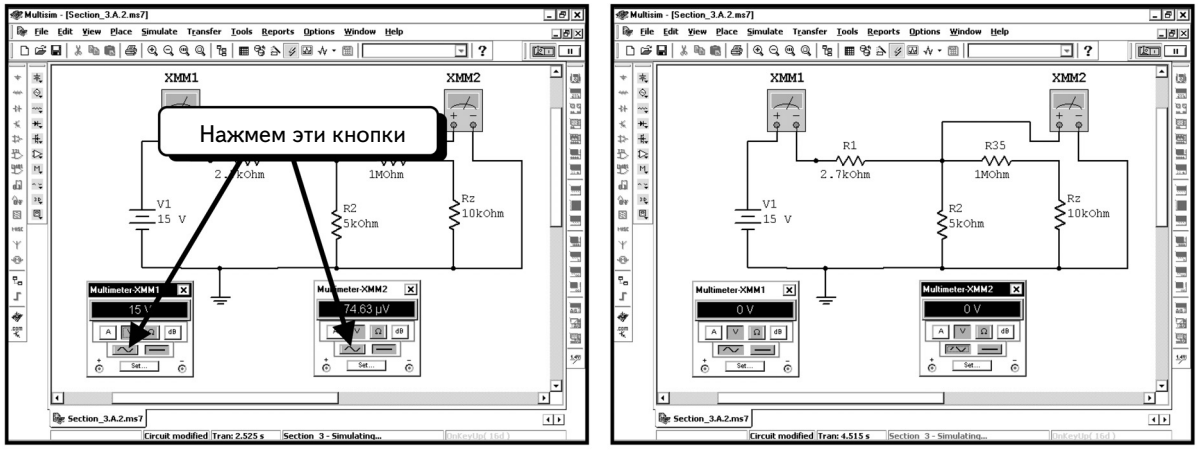


Отметим, что можно изменять настройки мультиметра во время моделирования. Настроим мультиметр **XMM1** на считывание напряжения:

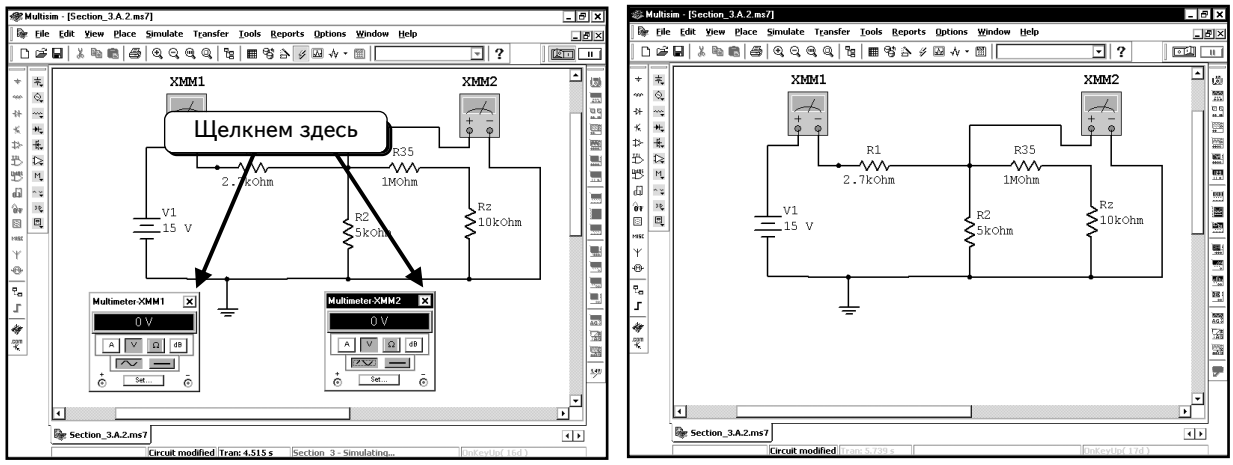


Через несколько секунд значения, показываемые измерителями, изменятся. Обратите внимание на то, что значение, показываемое устройством **XMM2**, тоже изменилось. Причина заключается в том, что при настройке мультиметра **XMM1** на считывание напряжения в цепь последовательно включилось внутреннее сопротивление вольтметра в 1 ГОм, что привело к изменению всех параметров в схеме. Разумеется, это неправильно, поэтому надо восстановить начальную настройку устройства **XMM1** (измерение тока).

С помощью мультиметров можно измерять значения как при постоянном, так и при переменном токе любой формы. Переключиться в режим переменного тока можно, нажав на кнопку AC :



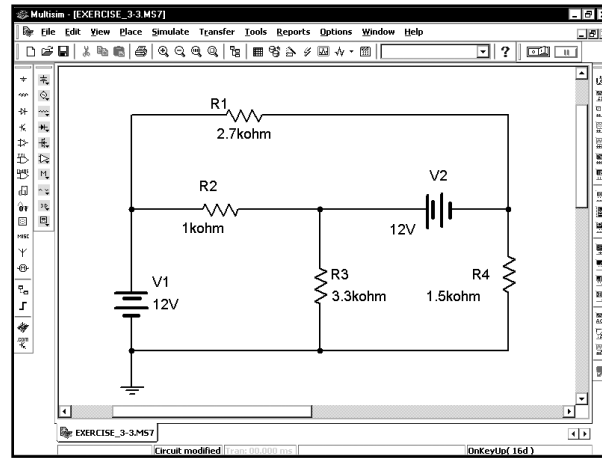
Через несколько секунд оба мультиметра изменят свое значение, показывая **0**, поскольку в системе нет источников питания переменного тока. Можно закрыть окно приборе, щелкнув по символу  в верхнем правом углу:

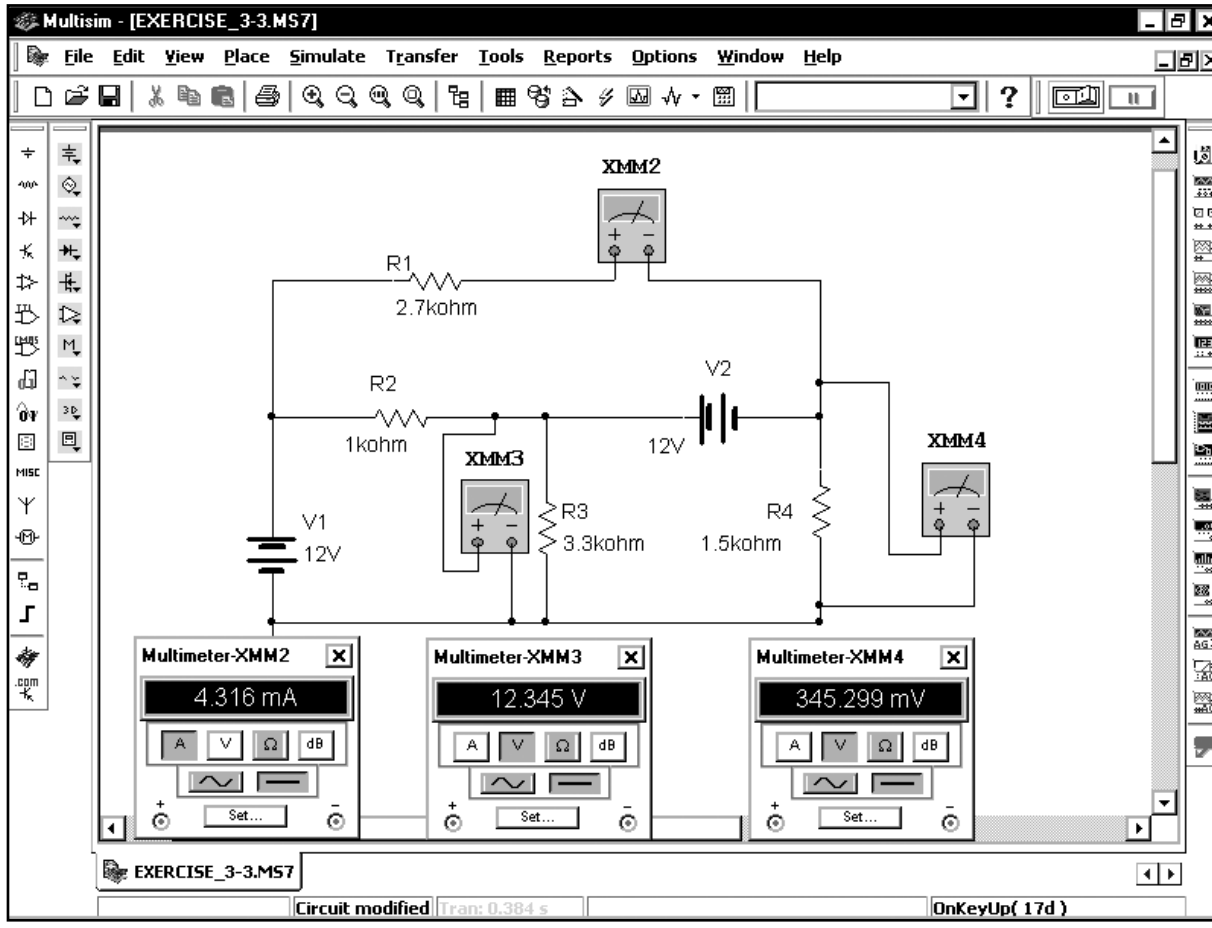


Не забудьте нажать клавишу **F5**, чтобы остановить моделирование.

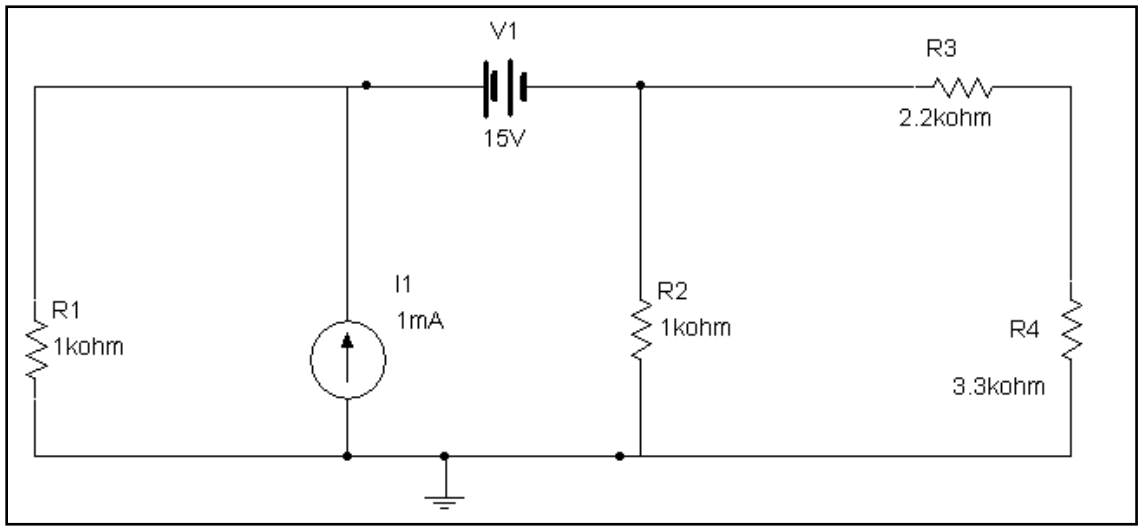
УПРАЖНЕНИЕ 3-3: С помощью мультиметров определите напряжения на узлах и ток через резистор R1:

РЕШЕНИЕ:

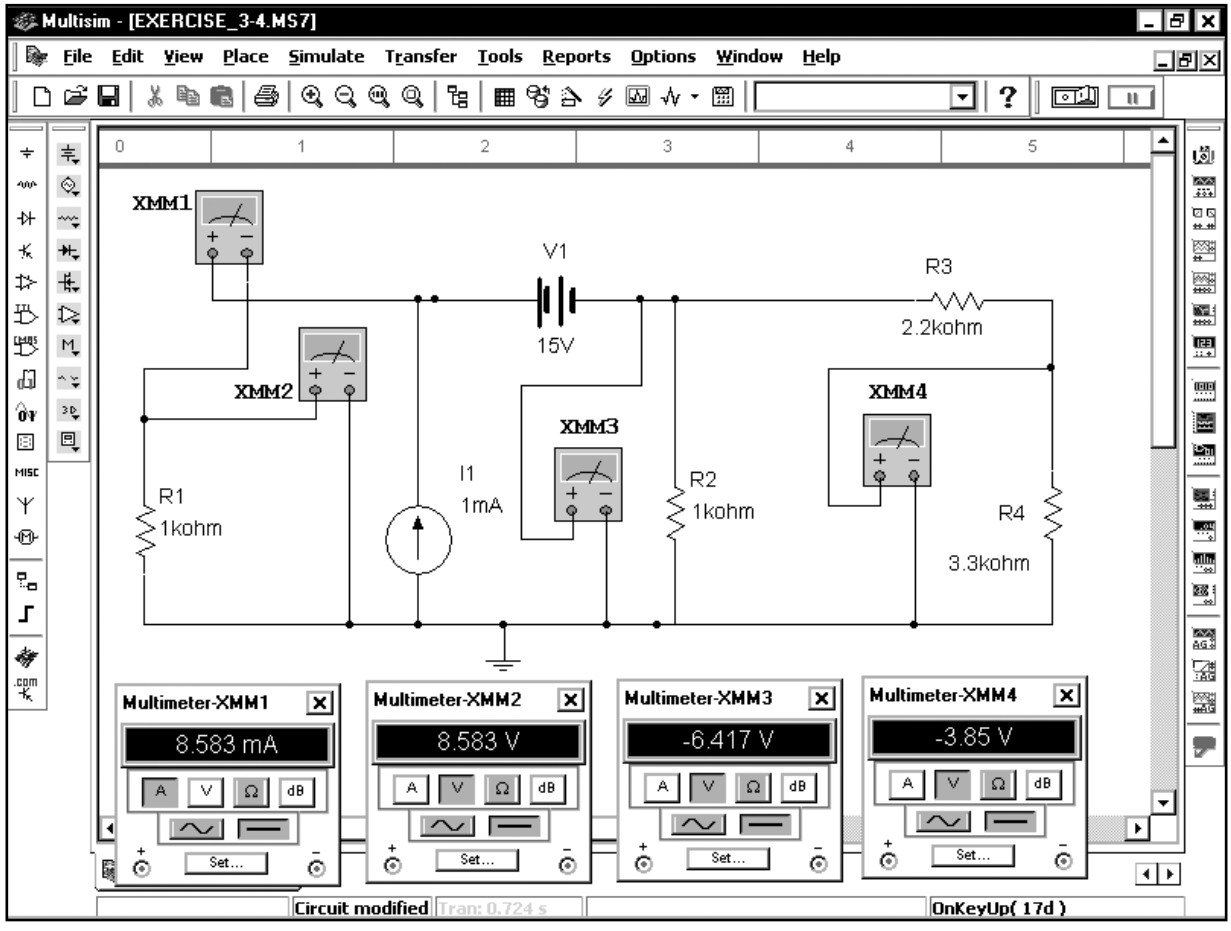




УПРАЖНЕНИЕ 3-4: С помощью мультиметров в режиме DC определите напряжения на узлах и ток через резистор R1:

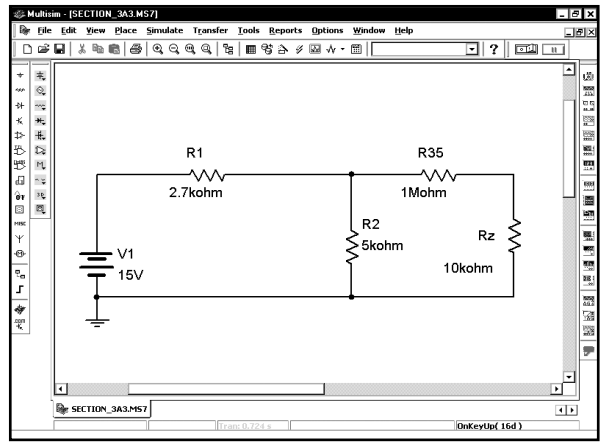


РЕШЕНИЕ:

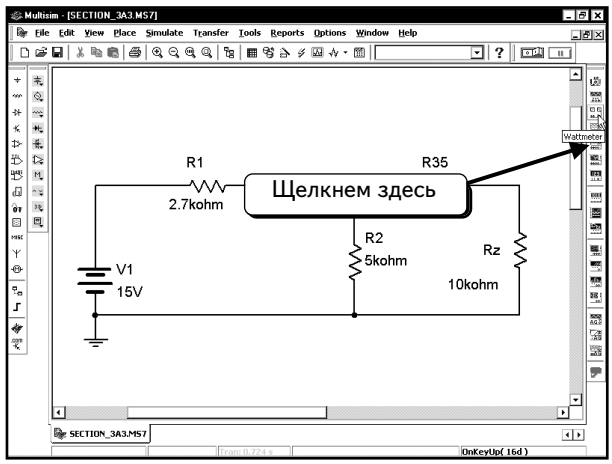


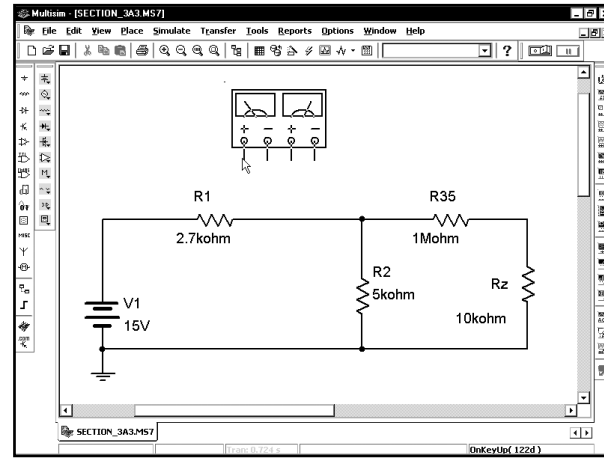
3.1.3. Использование ваттметра

Для измерений в исследуемой нами схеме можно использовать ваттметры. Будем работать с той же схемой, что и ранее:

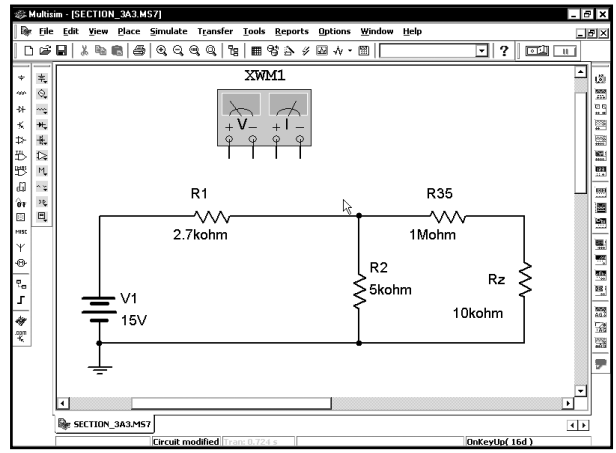


Дважды щелкнем по иконке **Wattmeter (Ваттметр)**  на панели инструментов. Ваттметр будет «привязан» к курсору мыши:

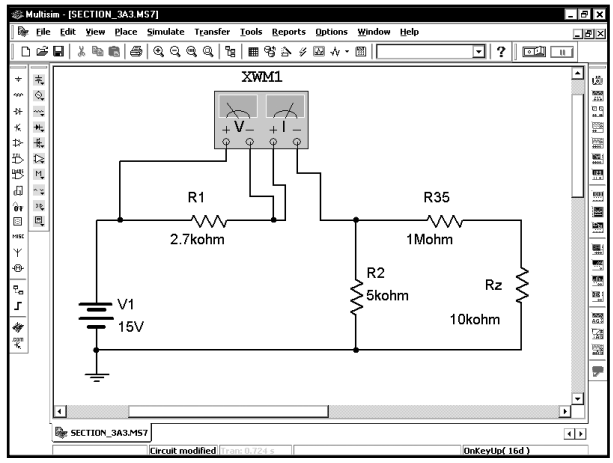




Чтобы отобразить мощность, рассеиваемую резистором R1, поместим устройство так, как показано ниже:

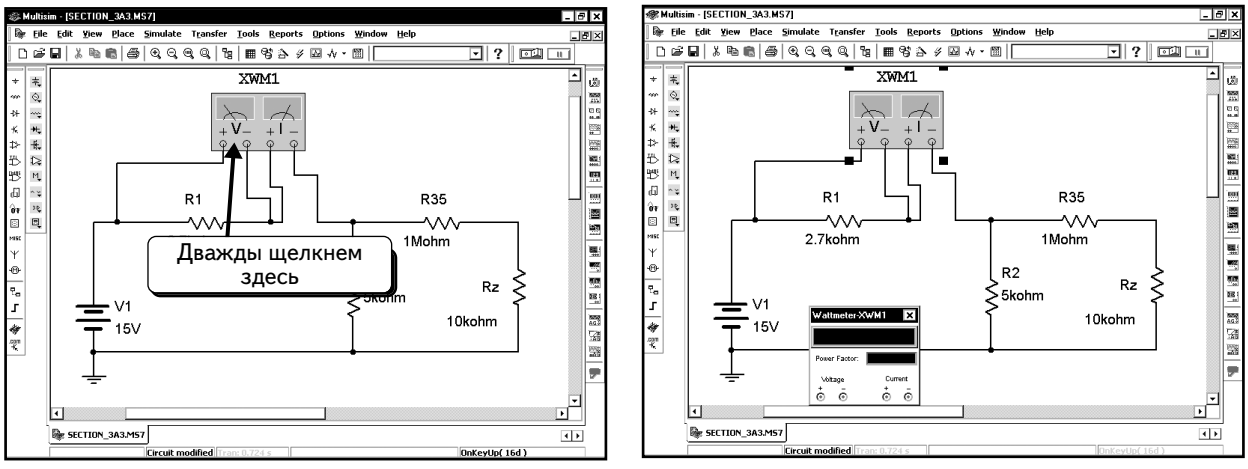


Чтобы измерить мощность, рассеиваемую резистором R1, нужно измерить напряжение и ток через резистор. Измерение тока с помощью ваттметра выполняется так же, как и с помощью мультиметра или индикатора тока; если ток входит в «плюс» и выходит из «минуса», на экране отобразится положительное значение. Подключим устройство:

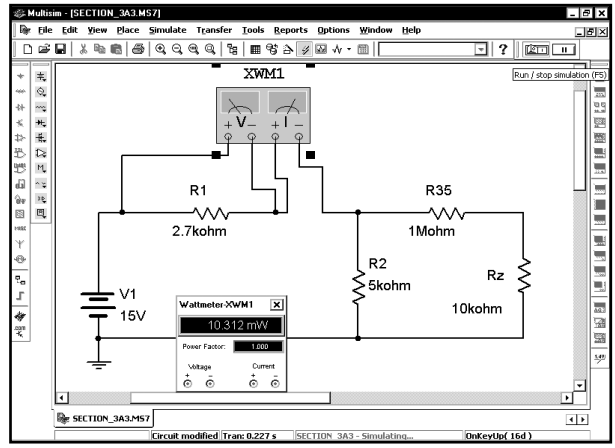


Как видим, устройство измеряет напряжение на левом контакте резистора R1 как положительное, а ток проходит слева направо. Таким образом, значения тока и напряжения положительны, и мощность вычисляется по формуле P = VI. Данная формула применима только в случае, когда положительный ток втекает в «плюс» измерителя тока.

Дважды щелкнем по ваттметру, чтобы открыть окно этого прибора:

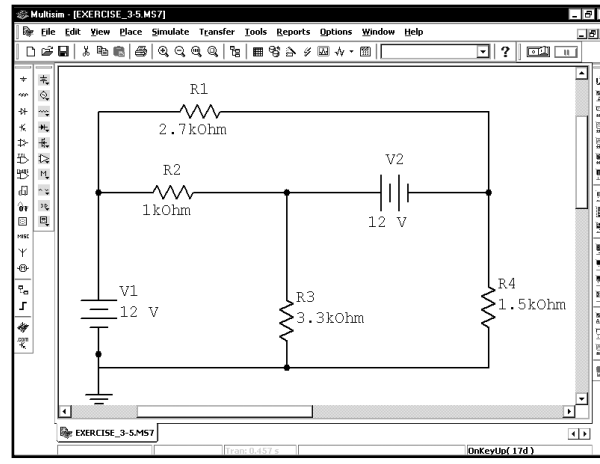


Ваттметр может измерять мощность переменного или постоянного тока. Чтобы начать моделирование, выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Run**, нажмем клавишу **F5**, кнопку ***Run/stop simulation***  или кнопку моделирования  :

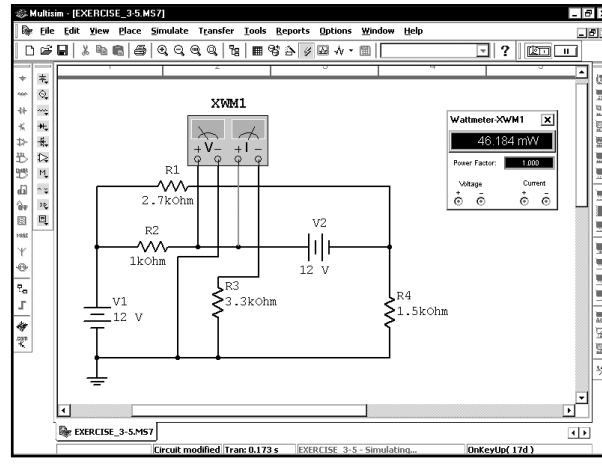


На табло прибора видно, что резистор R1 рассеивает **10,312 mW** (мВт) мощности.

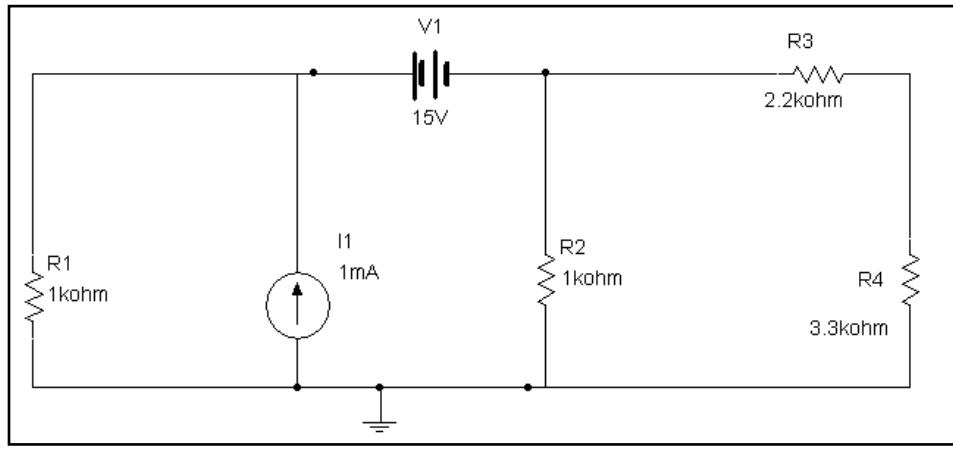
УПРАЖНЕНИЕ 3-5: Определите, какую мощность рассевает резистор R3:



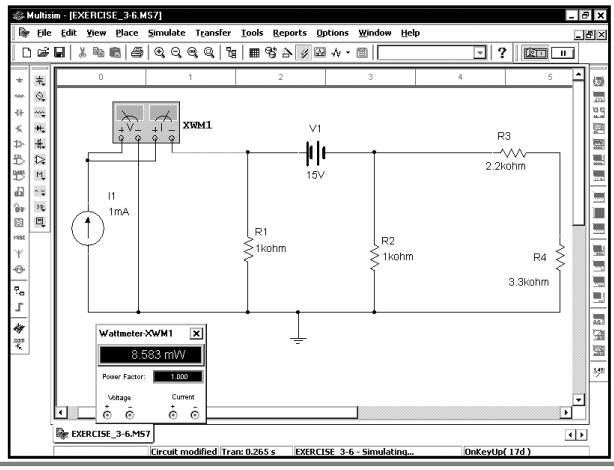
РЕШЕНИЕ: Включите в схему ваттметр, как показано, и проведите моделирование:



УПРАЖНЕНИЕ 3-6: Определите мощность источника тока I1:

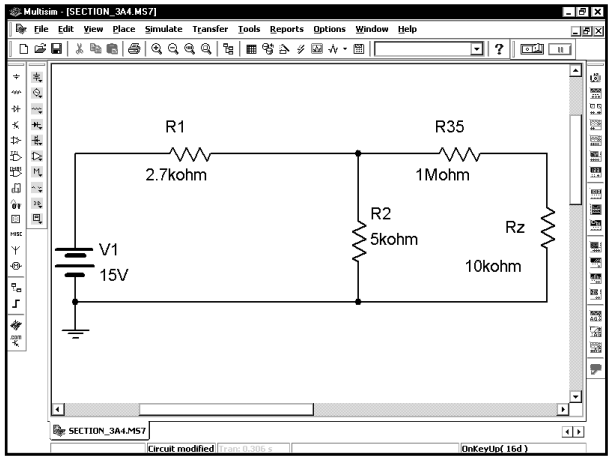


РЕШЕНИЕ: Измените схему подключения ваттметра и проведите моделирование:

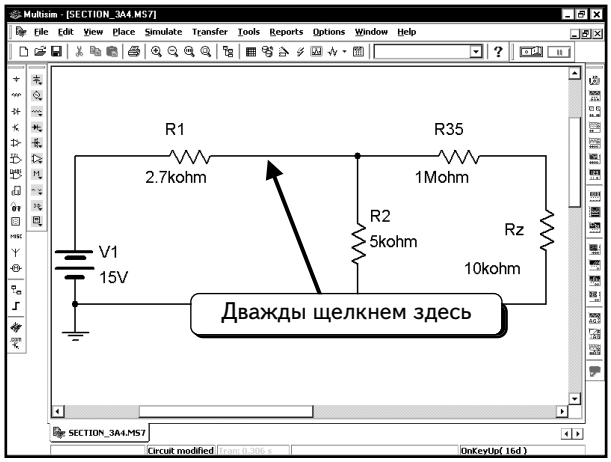


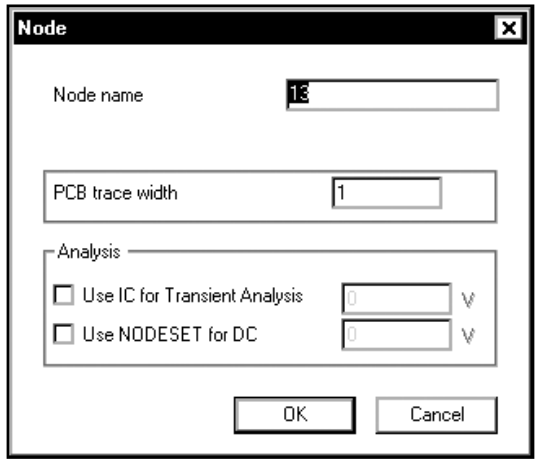
3.1.4. Анализ DC Operating Point Analysis

Последний метод моделирования схемы и вычисления постоянных напряжений для узлов, о котором мы расскажем, — это анализ **DC Operating Point Analysis (Анализ рабочей точки)**. Начнем анализ на примере схемы из предыдущего раздела:



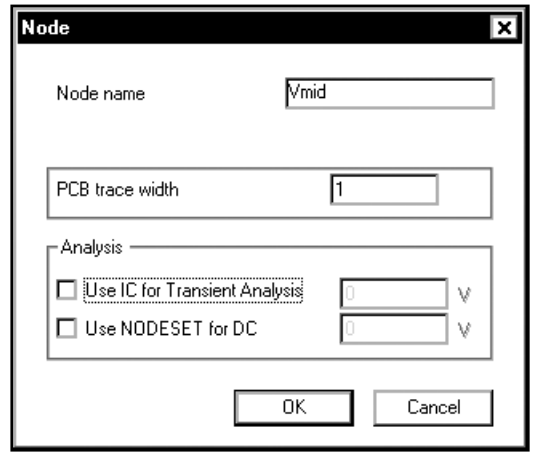
Этот анализ позволяет определить напряжение для всех узлов схемы. Мы не знаем, как именно пронумерованы узлы. Чтобы выяснить это, дважды щелкнем по проводу, подходящему к узлу, например, по проводу, подключенному к среднему узлу:



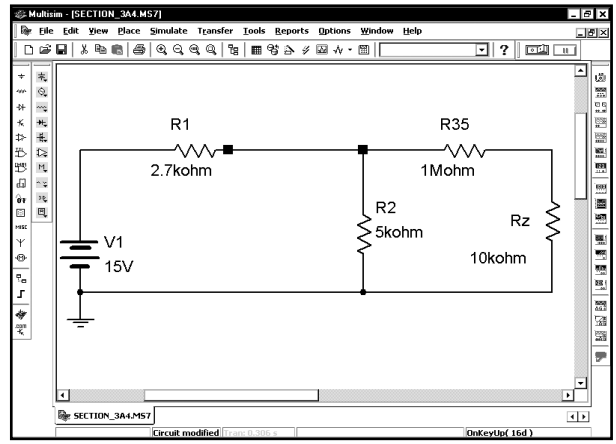


В открывшемся диалоговом окне видно, что узел имеет номер 13 (в вашей схеме нумерация может отличаться).

Кроме того, можно изменить название узла, например на название «**Vmid**»:

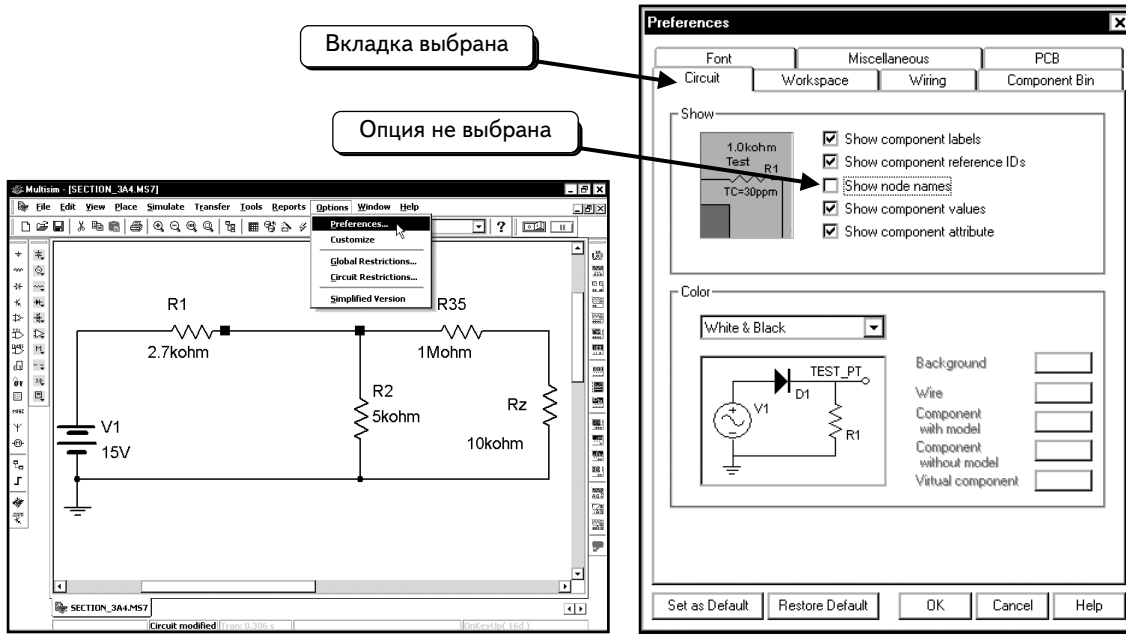


Нажмем кнопку **OK**, чтобы сохранить изменения:

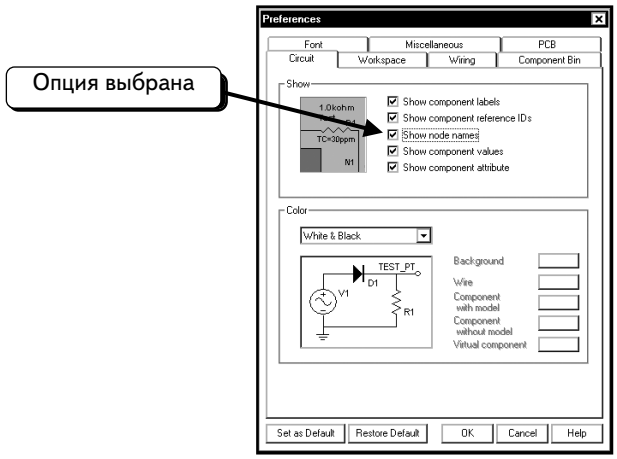


Теперь известно название узла, но оно не показано на схеме.

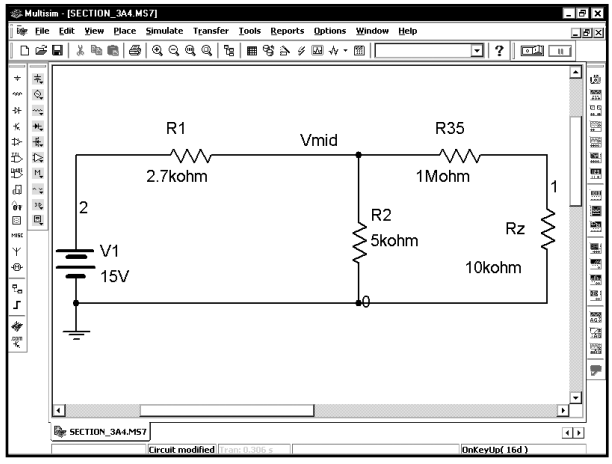
Чтобы отобразить названия узлов, выберем в меню пункты **Options ⇒ Preferences (Опции ⇒ Параметры)**:



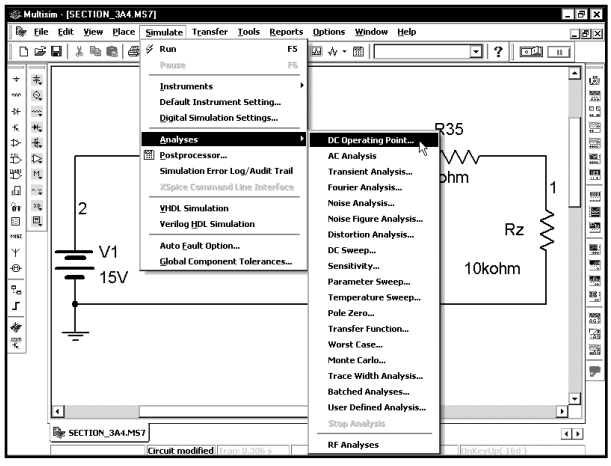
Если вкладка **Circuit (Схема)** не выбрана, щелкнем по ней. Обратите внимание на то, что в диалоговом окне выше не выбрана опция, предназначенная для отображения названий узлов. Выберем эту опцию. Щелкнем по пустому полю ☐ рядом с опцией **Show node names (Отображать названия узлов)** — в поле появится галочка ☑:

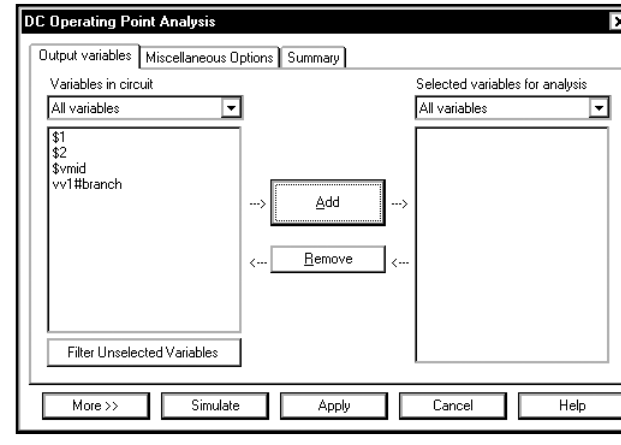


После нажатия на кнопку **OK** вернемся к схеме, на которой отобразятся названия узлов:

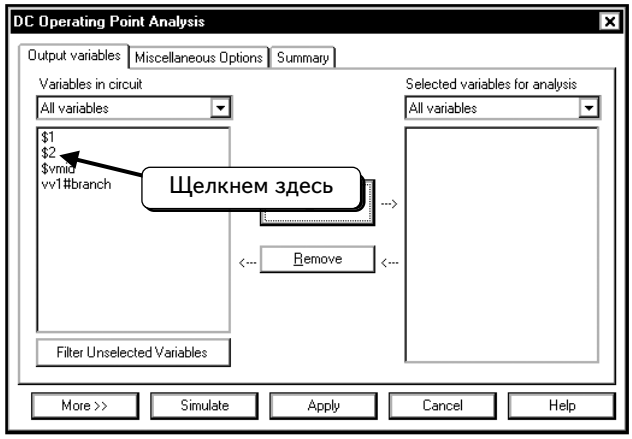


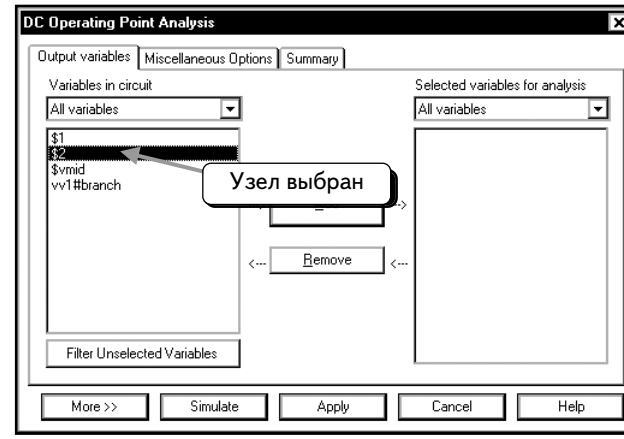
Нумерация узлов в вашей схеме может быть другой. При желании можно переименовать все узлы, кроме узла 0. Теперь, зная имя узла, можно выполнить анализ рабочей точки. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Analyses ⇒ DC Operating Point (Моделировать ⇒ Анализы ⇒ Анализ рабочей точки)**:



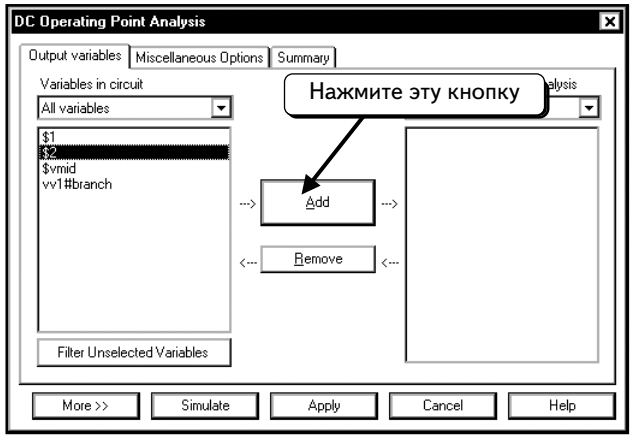


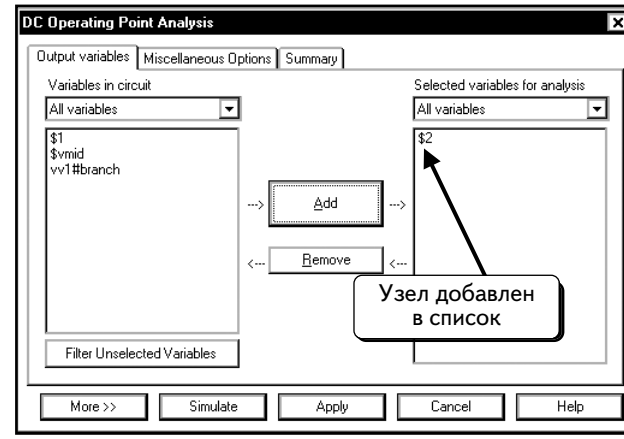
Нам осталось лишь выбрать нужные узлы. Чтобы выбрать узел, щелкнем по нему, например, по узлу $2, как показано, и он будет выделен:



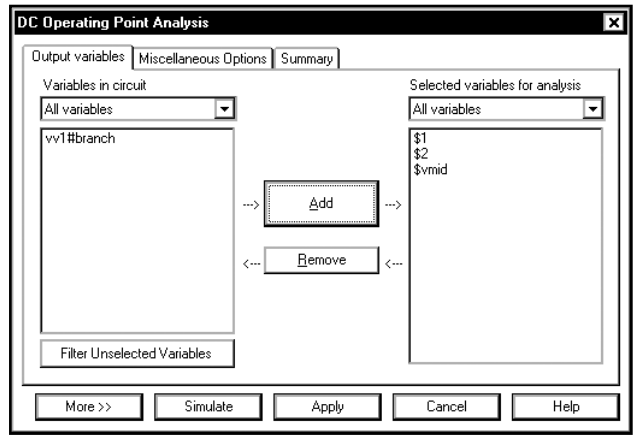


Нажмем кнопку **Add** (**Добавить**). Узел будет добавлен в список:

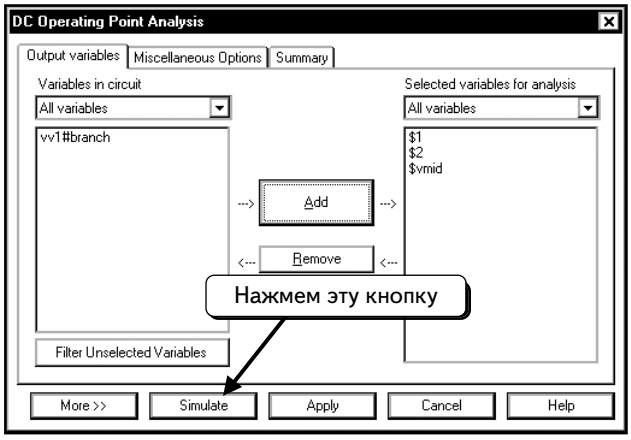


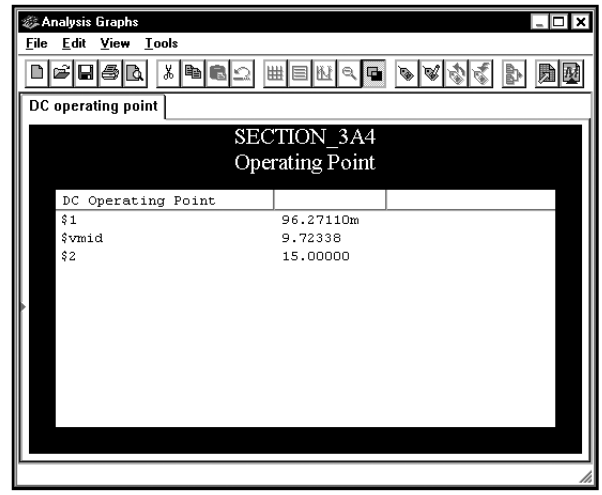


Повторим процедуру, чтобы добавить узлы **$1** и **$vmid**:



Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Результаты отобразятся в новом окне:

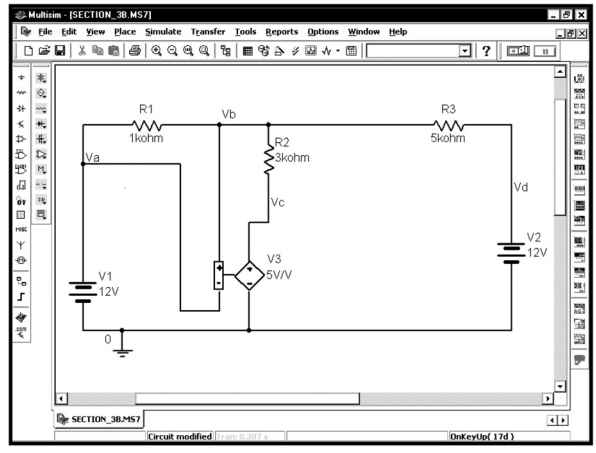




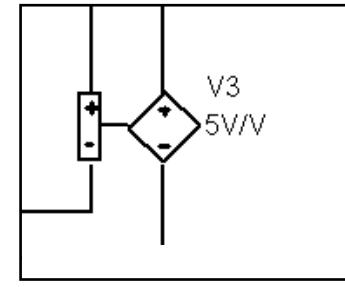
Как видим, напряжение узла **$1** равно **96,27** мВ, узла **Vmid** — **9,72** В, а узла **$2** — **15** В. Эти результаты соответствуют результатам, полученным во время измерений.

3.2. Анализ узловых напряжений в цепях с зависимыми источниками

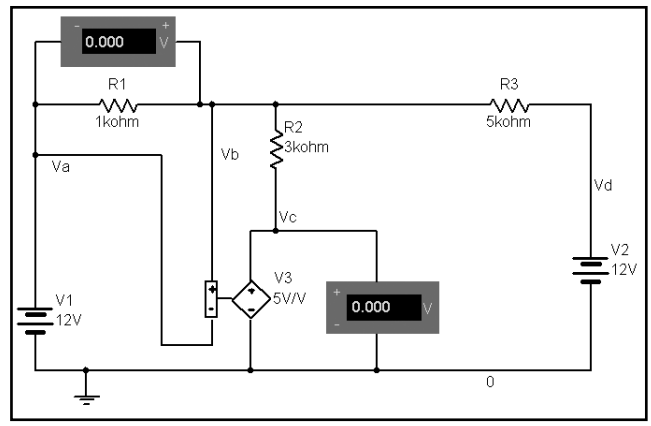
Чтобы проиллюстрировать пример с зависимыми источниками, определим напряжения на узлах в схеме, которая показана ниже. Создадим такую схему:



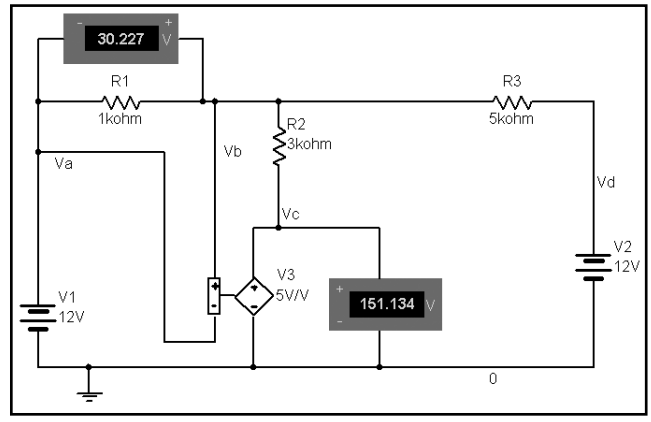
В схеме появился новый компонент (источник напряжения, управляемый напряжением). Напряжение узла **Vc** в 5 раз превышает напряжение на резисторе **R1**: Vc = 5(Vb—Va). Если щелкнуть по источнику напряжения, то можно увидеть укрупненое изображение зависимого источника напряжения. Полюса «плюс» и «минус» управляющего элемента (слева) подключены к схеме. Ток через него не протекает, он реагирует только на напряжение между узлами, к которым он подключен. Справа на укрупненном условном обозначении находится источник напряжения. Напряжение этого источника в пять раз превышает напряжение на управляющем элементе.



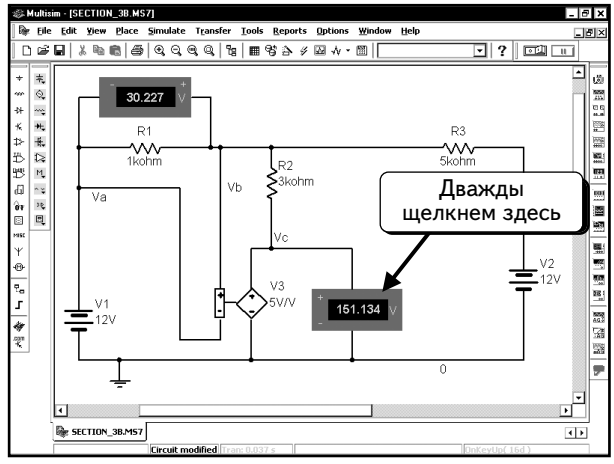
Для измерения напряжения между узлами можно использовать любой метод, описанный в разделе 3.1 Воспользуемся индикаторами напряжения. При желании можно использовать анализ рабочей точки или мультиметр. Измененная схема показана ниже:

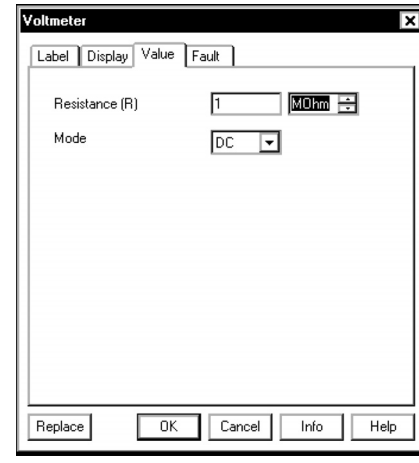


После внесения изменений щелкнем по кнопке **Run/stop simulation**  , чтобы выполнить моделирование. Индикаторы отобразят напряжения узлов DC:



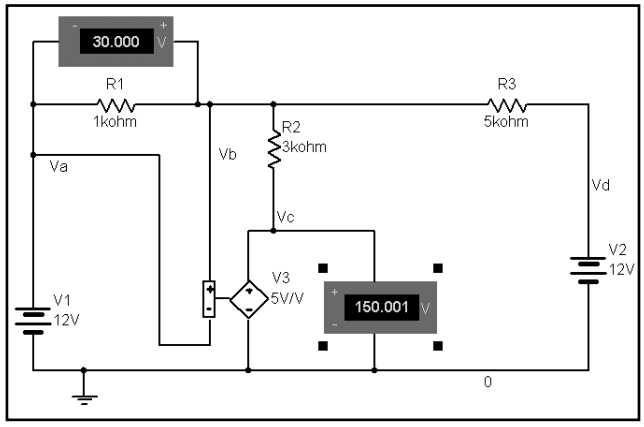
Эта схема оказалась очень чувствительной к параллельному сопротивлению индикаторов напряжения. Изменим внутреннее сопротивление индикаторов с 1 МОм (значение по умолчанию) на 1 ГОм. Сначала остановим моделирование: нажав кнопку **Run/stop simulation** . Дважды щелкнем по одному из индикаторов напряжения:





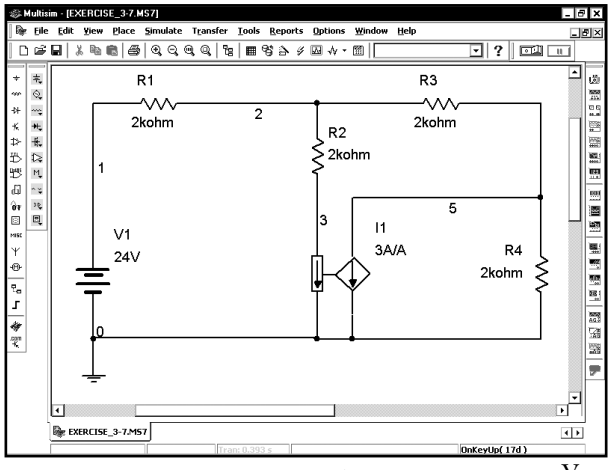
Мы видим, что по умолчанию для параллельного сопротивления используется значение 1 МОм. Чтобы сравнить результаты моделирования с результатами расчетов, нужно увеличить внутреннее сопротивление вольтметра. Изменим значение на 1 ГОм и потом нажмем кнопку **OK**. Изменим значения для всех индикаторов напряжения

в схеме на 1 ГОм. Обратите внимание: на схеме не отображено ни значение параллельного сопротивления, ни режим **DC**. Чтобы скрыть информацию, выполнена процедура, которая описана на стр. 126—129. Нажмем кнопку **Run/stop simulation**  , чтобы выполнить моделирование схемы и обновить показания индикаторов:



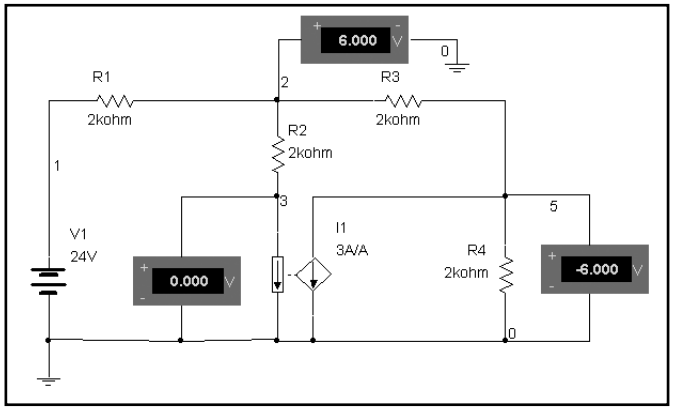
Показания приборов изменились. В большинстве моделей следует использовать значение 1 ГОм или большее для параллельного сопротивления индикаторов напряжения. В противном случае индикаторы напряжения могут оказать влияние на работу схемы.

УПРАЖНЕНИЕ 3-7: Определите постоянное напряжение на узлах схемы:

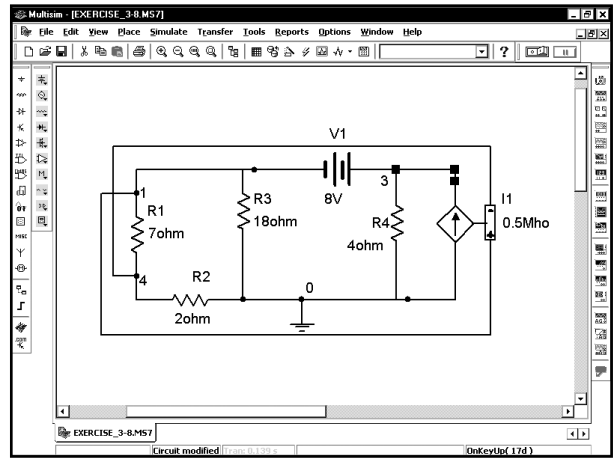


ПОДСКАЗКА: Компонент **I1** является источником тока, управляемым током. Узел 3 подключен к заземлению. Таким образом, напряжение узла 3 равно 0 В. Узел 3 необходим, так как он соединяет нижний контакт резистора R2 и управляющий элемент источника **I1**.

РЕШЕНИЕ: С помощью мультиметров или индикаторов напряжения измерьте напряжения узлов. Напряжение узла 1 известно и равно V1:

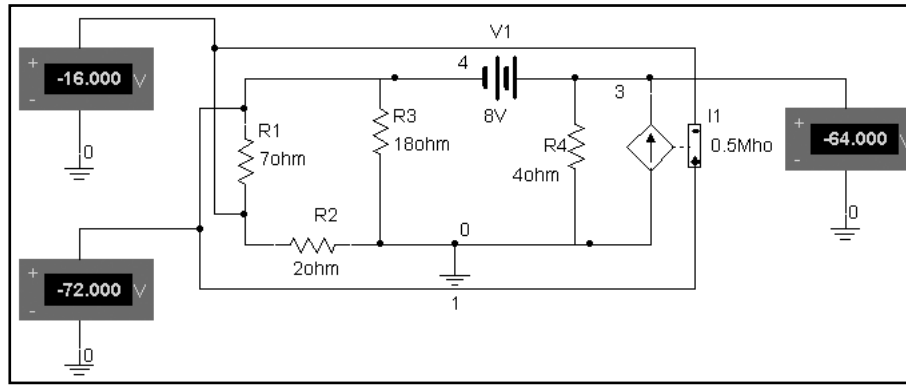


УПРАЖНЕНИЕ 3.8. Определите постоянные напряжения на узлах схемы:

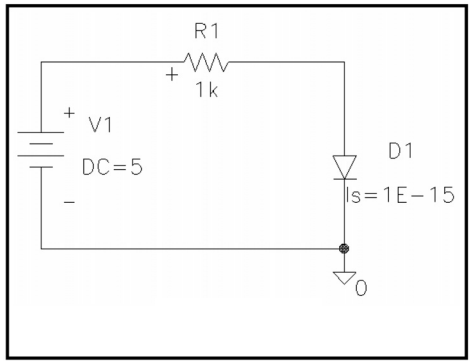


ПОДСКАЗКА: Компонент **I1** является источником тока, управляемым напряжением. Ток источника **I1** равен численно равен половине напряжения между узлами 1 и 4.

РЕШЕНИЕ: Добавьте в схему индикаторы напряжения и измените их внутреннеее сопротивление на 1 ГОм:

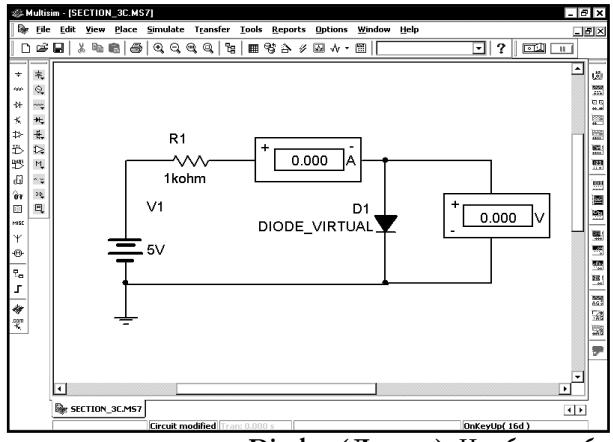


3.3. Ток и напряжение диода

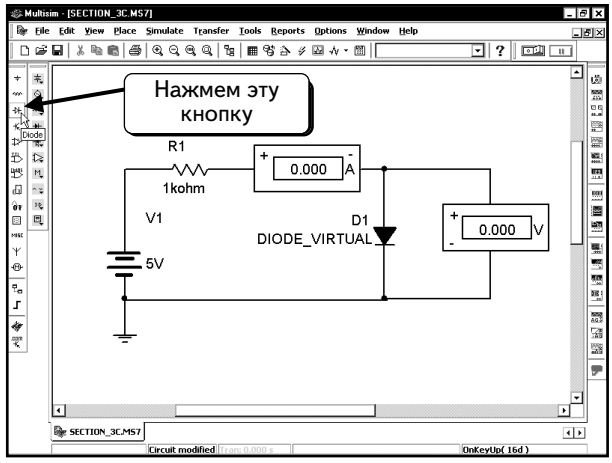


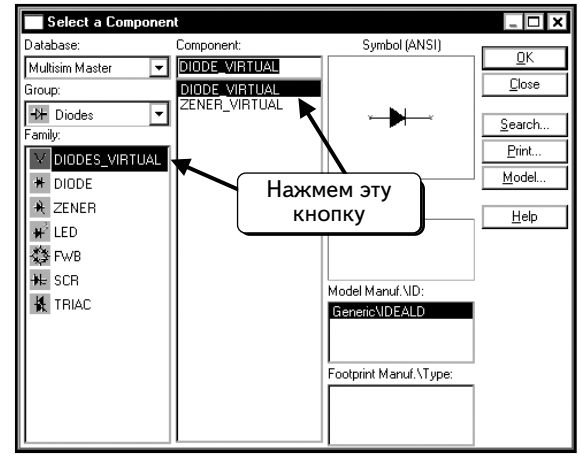
С помощью программы Multisim определим ток и напряжение диода в схеме. Ток диода определяется по формуле: $I_D = I_S[\exp(V_D/\eta V_T)-1]$, где I_S — ток насыщения диода и в данном примере составляет 10^{-15} А; V_T —температурный потенциал, равный 25,8 мВ при комнатной температуре; η — коэффициент эмиссии для диода (по умолчанию используется значение 1). Программа Multisim выполняет моделирование при комнатной температуре (по умолчанию).

При использовании в схеме диода, необходимо указать его модель. В нашем случае по модели диода программа Multisim определит значение I_S. Библиотека диодов содержит большое количество стандартных моделей. Однако модели данного диода нет в библиотеке, поэтому нам придется создать новую модель. Используем для этого компонент **DIODE_VIRTUAL**. Создадим схему, показанную ниже:



Модель **DIODE_VIRTUAL** находится в группе **Diodes (Диоды)**. Чтобы отобразить список диодов, нажмем кнопку **Diode** :

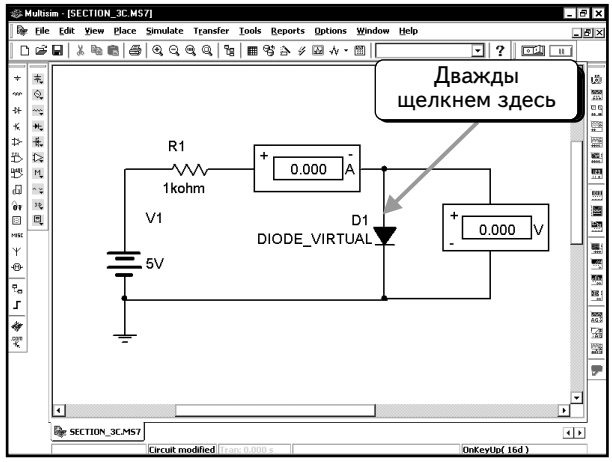


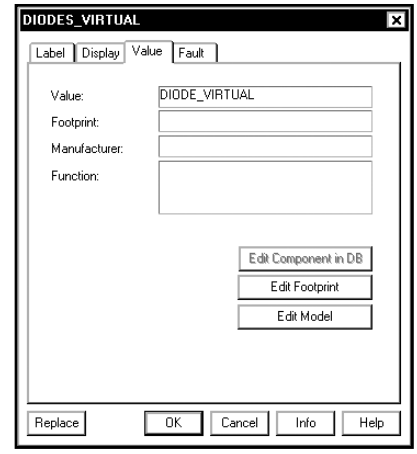


На схеме по умолчанию выбран виртуальный диод. Убедимся в том, что был выбран виртуальный диод, и нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент в схему.

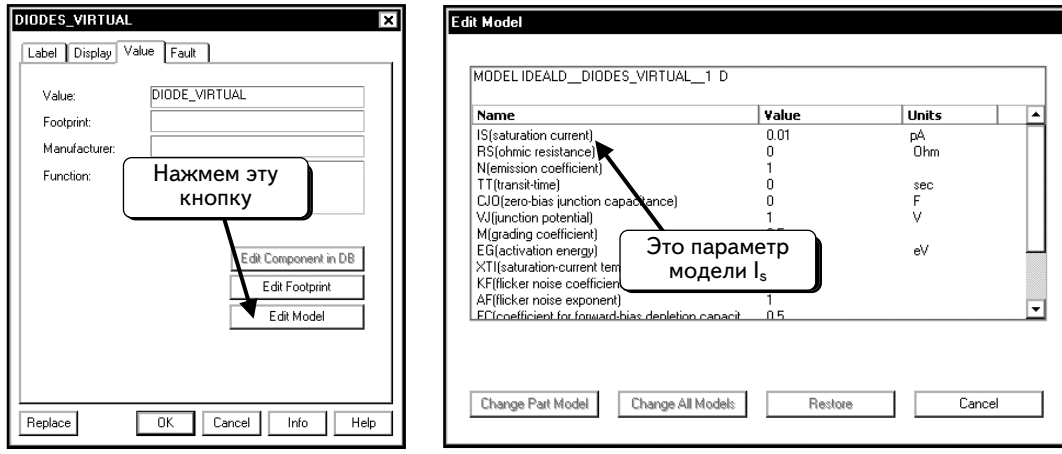
Виртуальные компоненты в программе Multisim являются «идеальными» (то есть не привязанными к определенному типу реальных диодов, параметры их модели легко изменяются). Виртуальный диод использует базовое уравнение диода: $I_D = I_S[\exp(V_D/V_\eta) - 1]$ при η, равном 1. Прочие параметры модели задаются по умолчанию.

После добавления диода в схему следует изменить параметр I_S. Дважды щелкнем по иконке диода:

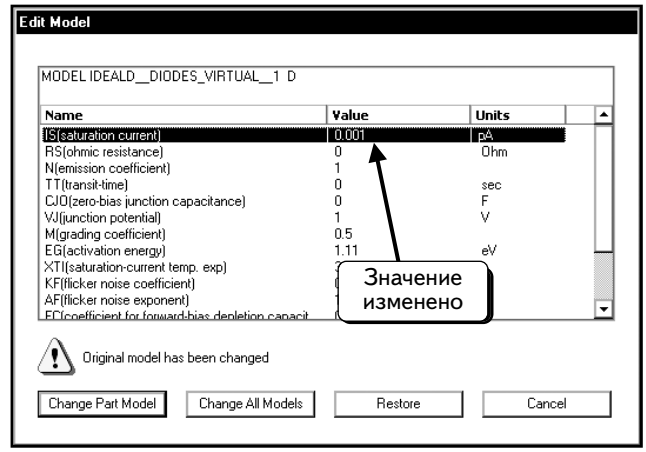




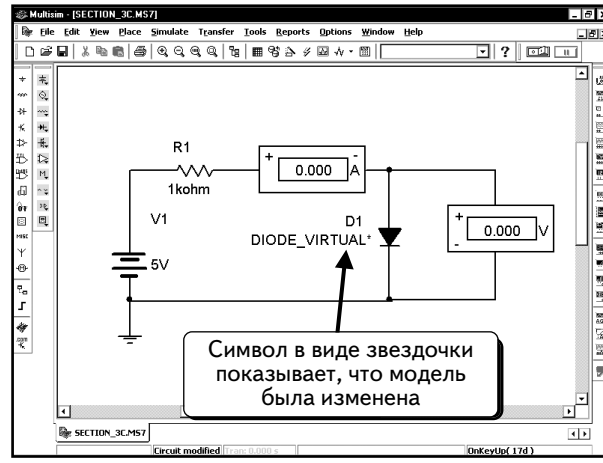
Нажмем кнопку **Edit Model (Редактировать модель)**:



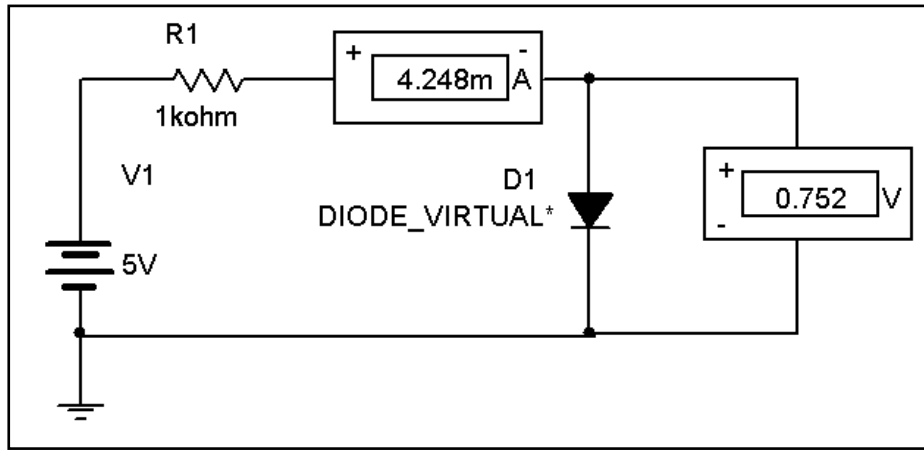
Видим, что по умолчанию для тока насыщения используется значение **0,01 pA** (0,01 пА) или $I_S = 10^{-14}$ А. Изменим значение на **0.001 pA**:



Нажмем кнопку **Change Part Model** (**Изменить модель компонента**), затем кнопку **OK** и вернемся к схеме:

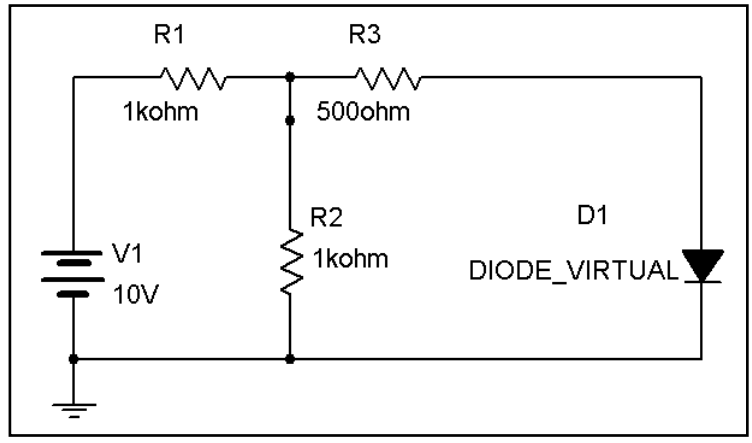


Рядом с названием компонента на схеме отобразится символ в виде звездочки. Это значит, что модель была изменена. Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы выполнить моделирование. Приборы покажут ток и напряжение диода:

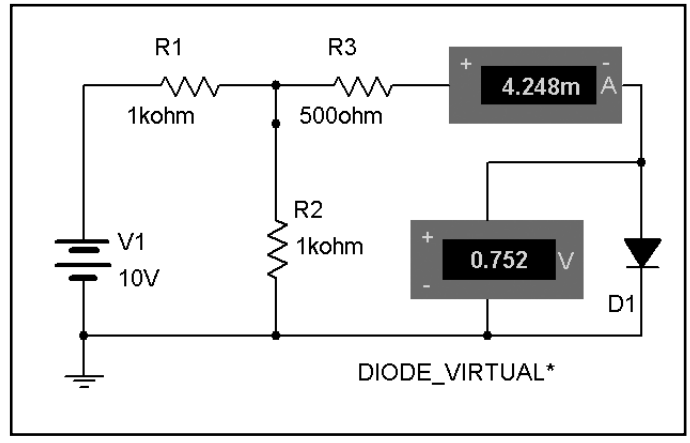


Как видим, что ток диода равен 4,248 мА, а напряжение на нем составляет 0,752 В:

УПРАЖНЕНИЕ 3-9: Определите ток и напряжение диода в схеме:



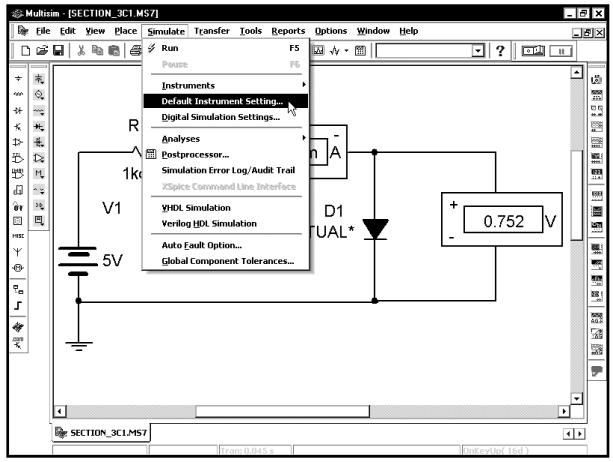
РЕШЕНИЕ: Воспользовавшись параметрами диода из предыдущего примера, подключите индикаторы согласно нижеприведенной схеме и выполните моделирование:

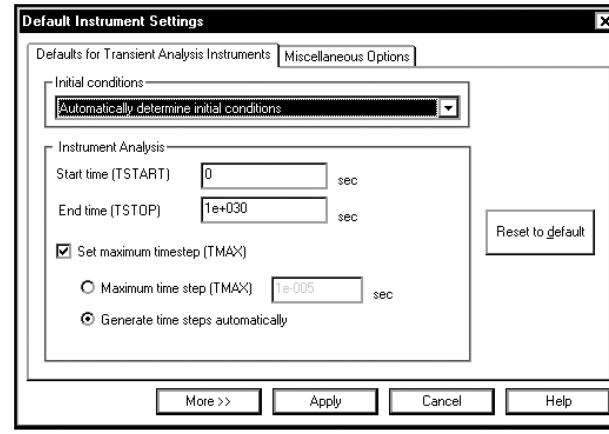


Напряжение на диоде равно 0,752 В, а ток составляет 4,248 мА. Эти значения совпадают с полученными в предыдущем примере. Результат очевиден: схема замещения по теореме Тевенина для V1, R1—R3 эквивалентна рассмотренной ранее схеме.

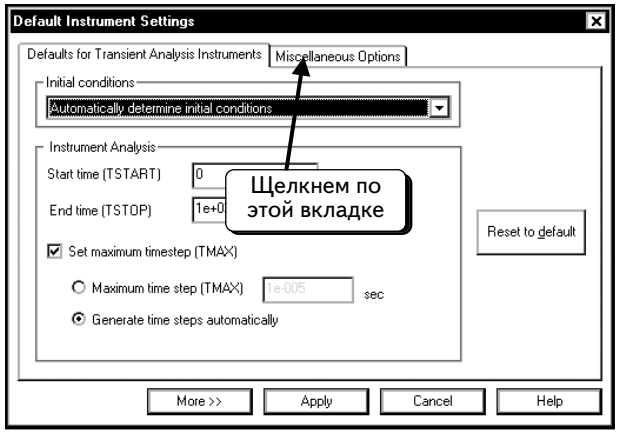
3.3.1. Изменение температуры, принятой при моделировании

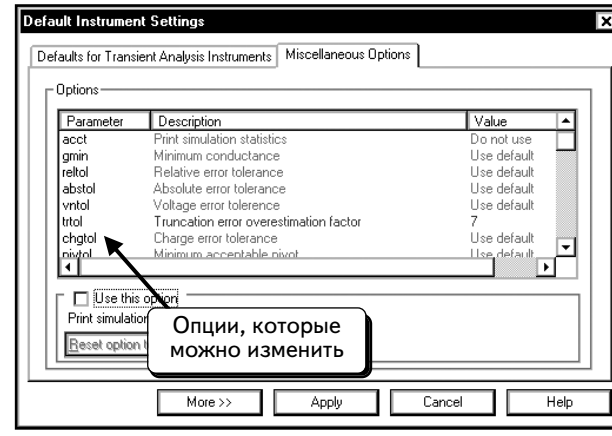
В последнем примере мы определили напряжение и ток диода при комнатной температуре (27 °C). Что необходимо сделать, чтобы смоделировать схему при другой температуре? Для этого следует изменить настройки по умолчанию. Выберем в меню программы Multisim пункты **Simulate ⇒ Default Instrument Setting (Моделировать ⇒ Настройки по умолчанию)**:



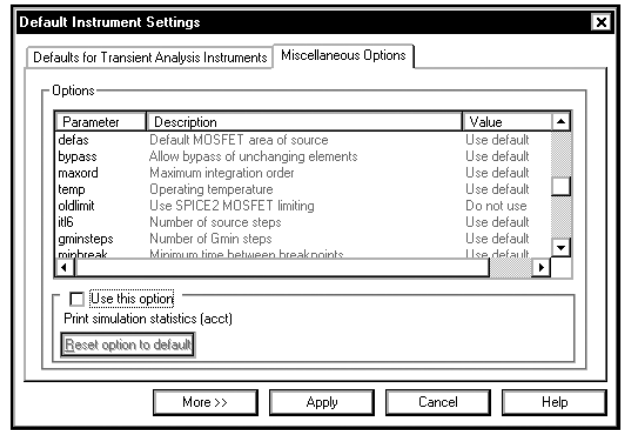


Щелкнем по вкладке ***Miscellaneous Options*** **(Прочие опции)**:

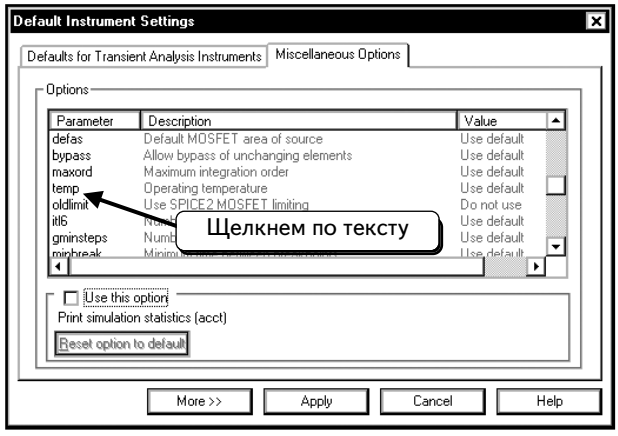


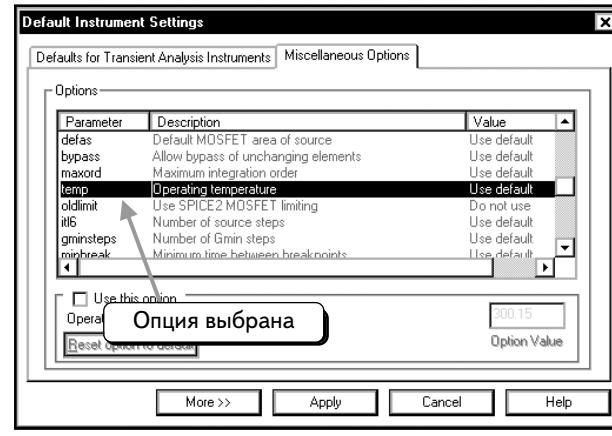


В этом диалоговом окне доступно большинство опций, которые можно изменить. Просмотрим список и найдем опцию ***temp***:

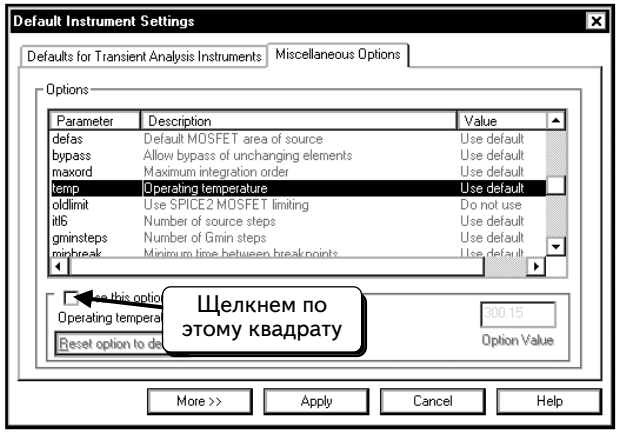


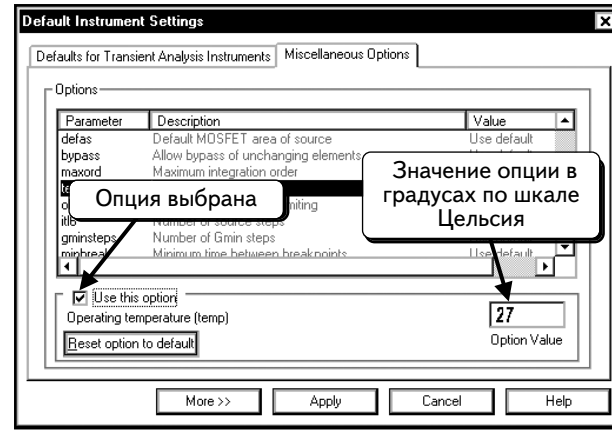
Щелкнем по опции ***temp***:



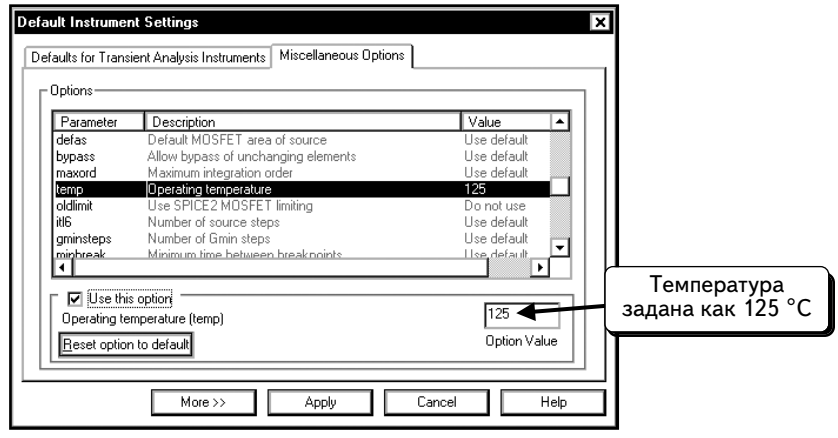


Чтобы изменить настройку, щелкнем по пустому полю ☐ рядом с пунктом ***Use This Option* (Использовать эту опцию)**. В поле появится галочка ☑ , показывающая, что опция выбрана:

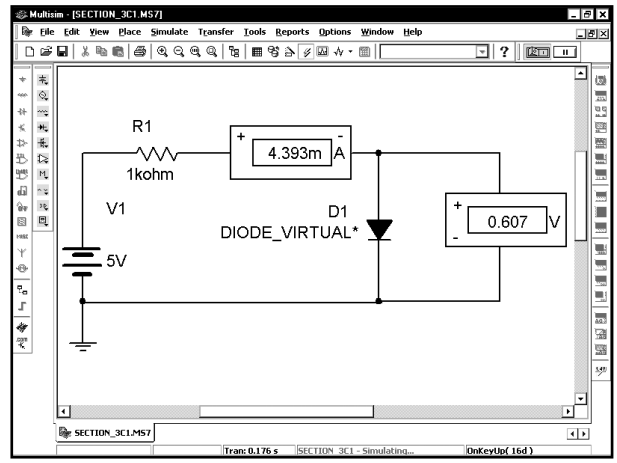




После этого в текстовом поле ***Option Value* (Значение опции)** появится соответствующее значение. Температура задается в градусах Цельсия. По умолчанию моделирование проходит при температуре 27 ˚С. В этом примере определим напряжение и ток диода при температуре 125 ˚С. Изменим значение опции так, как показано ниже:



Нажмем кнопку ***Apply* (Применить)**, чтобы принять изменения и вернуться к схеме. Чтобы выполнить моделирование, нажмем кнопку ***Run/stop simulation***  . Приборы покажут ток и напряжение диода при температуре 125 ˚С:



3.4. Получение эквивалентных схем по теоремам Тевенина и Нортона

С помощью программы Multisim можно получить эквивалентные схемы с источниками тока и напряжения (Norton and Thevenin equivalents) таким же образом, как и в лаборатории. Выполним два измерения: напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. Сопротивление схемы замещения по теореме Тевенина (источник напряжения) вычисляется путем деления напряжения холостого хода на ток короткого замыкания. Соответственно, нужно создать две схемы: для определений напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. В данном примере будем рассчитывать эквивалентные схемы с источниками постоянного тока и напряжения (DC). Можно применить эту процедуру и для расчета эквивалентных схем на переменном токе (схемы с конденсаторами или катушками индуктивности). Для этого необходимо использовать источники переменного тока и напряжения (AC).

В данном примере будем работать со схемой из **`УПРАЖНЕНИЯ 3.9`**, повторив ее еще раз:

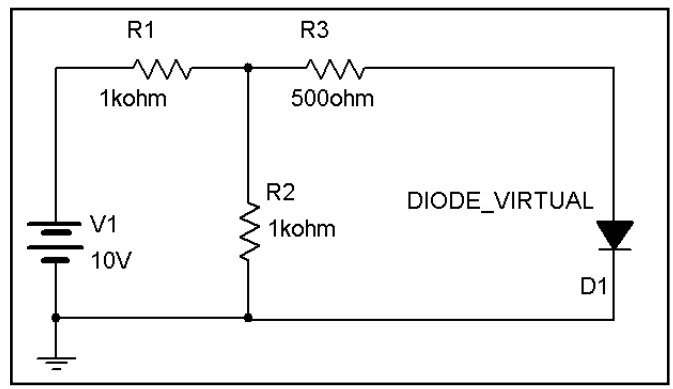
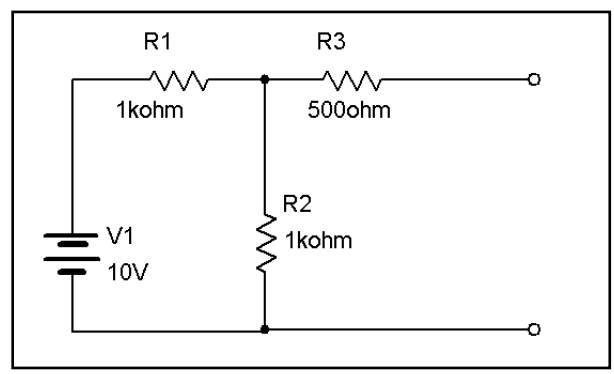
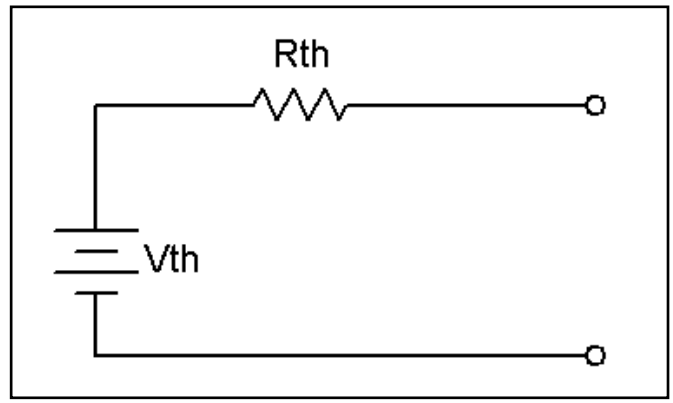


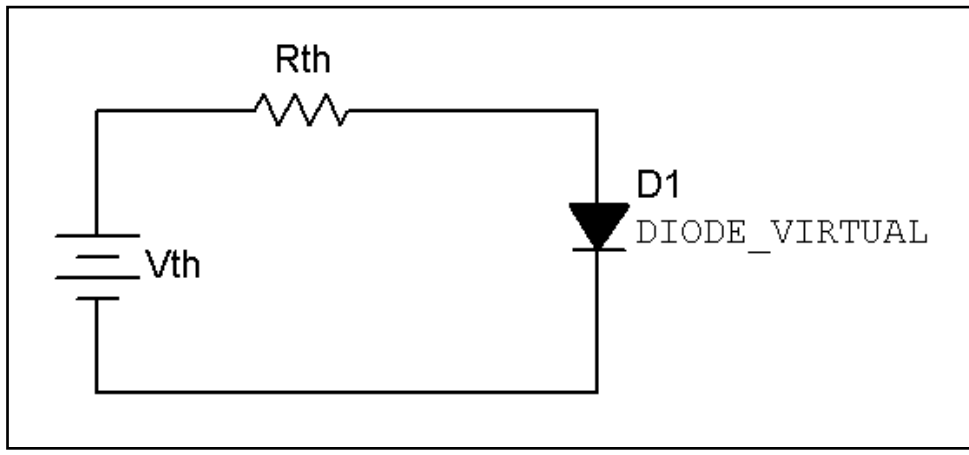
Схема достаточно сложна, так как она содержит нелинейный элемент (диод) наряду с линейными компонентами. Если заменить компоненты V1, R1, R2 и R3 неидеальным источником напряжения, анализ нелинейного элемента существенно упростится. Найдем схемы замещения по теоремам Тевенина и Нортона для линейной части схемы, которая подключена к диоду:



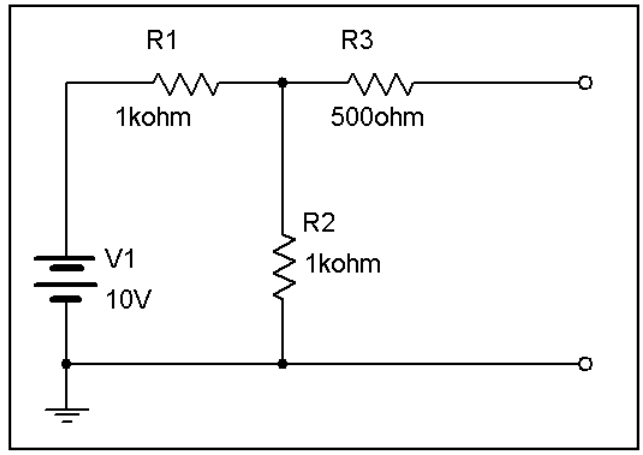
Преобразуем эту схему в схему замещения по теореме Тевенина:



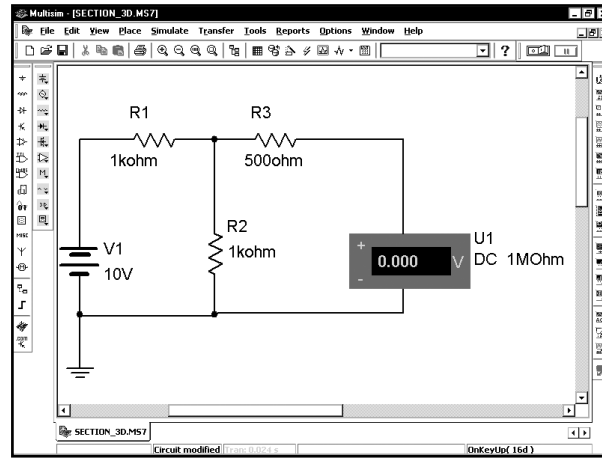
Когда рассчитаем значения для компонентов Vth и Rth, схема, приведенная в **УПРАЖНЕНИИ 3.9**, упростится:



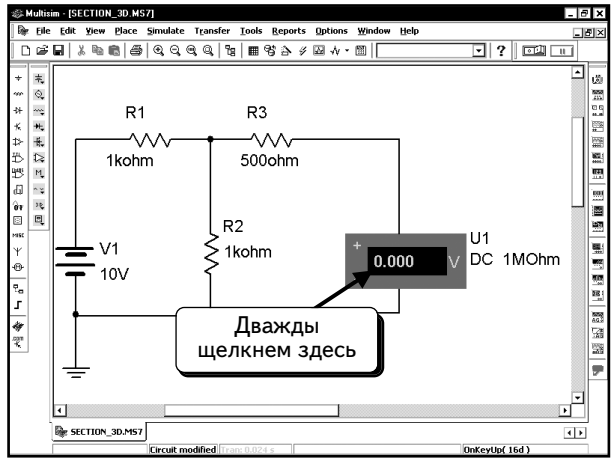
Полученная схема намного проще исходной. Рассчитаем значения в схеме замещения. Анализ схемы для определения напряжения и тока диода был описан в разделе 3.3. Рассчитаем схемы замещения по теоремам Тевенина и Нортона, как показано:

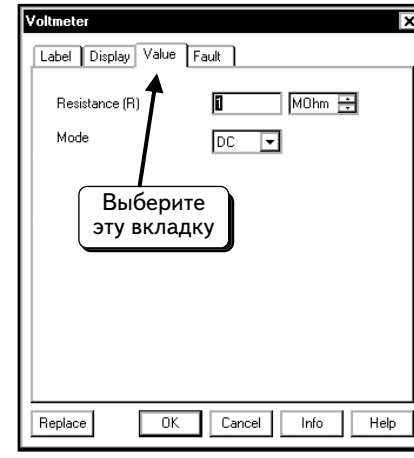


Сначала определим напряжение холостого хода, то есть напряжение на выходных полюсах вышеприведенной схемы в отсутствии нагрузки. Подключим к схеме заземление и индикатор напряжения:

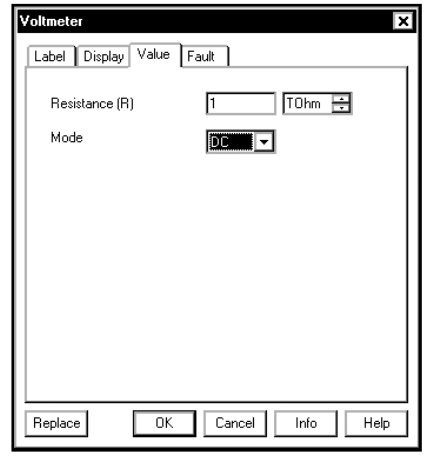


Теперь нижний полюс подключен к заземлению, то есть его напряжение равно 0 В. Перед моделированием необходимо изменить параметры индикатора напряжения. Щелкнем по нему дважды:

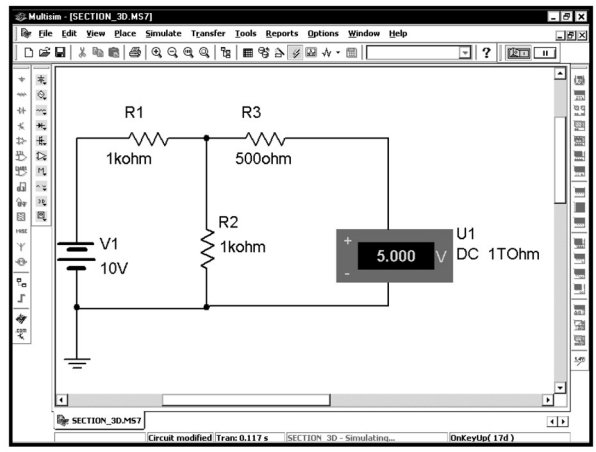




Щелкнем по вкладке **Value (Значение),** как показано ниже, и затем изменим сопротивление на 1 ТОм (10^{12} Ом):

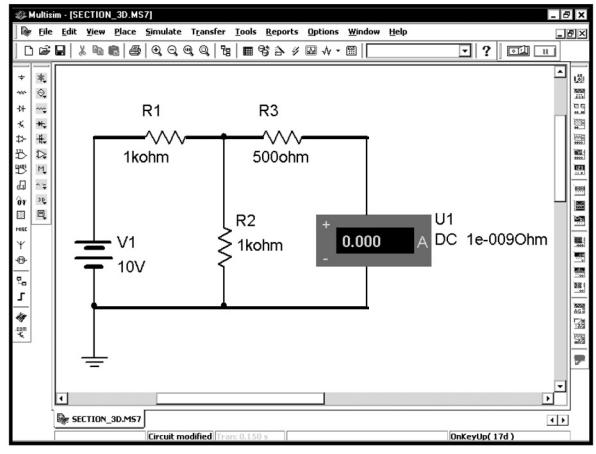


Такое сопротивление достаточно велико, чтобы можно было пренебречь протекающим через него током и считать, что измеряем напряжение холостого хода. Нажмем кнопку **OK**. Выполним моделирование, нажав клавишу **F5**:

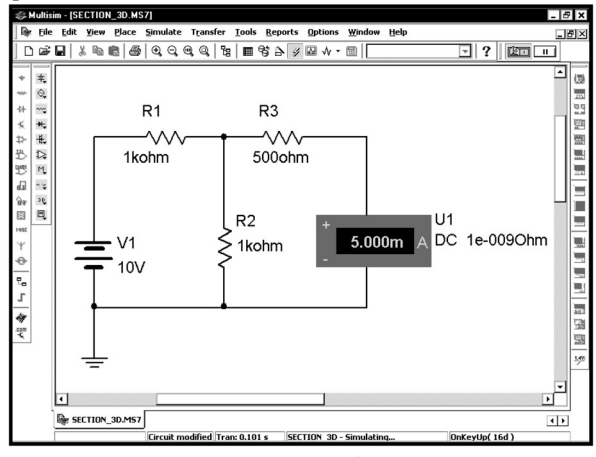


Напряжение холостого хода равно **5.000** В.

Далее необходимо измерить ток короткого замыкания, для этого достаточно заменить индикатор напряжения индикатором тока:



Измерители тока имеют очень низкое сопротивление, которое позволяет минимизировать их влияние на ток в схеме. В программе Multisim индикатор тока имеет последовательное сопротивление 1 нОм (или 10^{-9} Ом). Если подключить индикатор тока между двумя полюсами, как показано выше, это будет означать, что к ним подключен резистор с сопротивлением 1 нОм. Такого низкого сопротивления достаточно, чтобы схему можно было считать короткозамкнутой. Таким образом, на схеме вверху индикатор тока измеряет ток короткого замыкания. Осталось лишь выполнить моделирование:

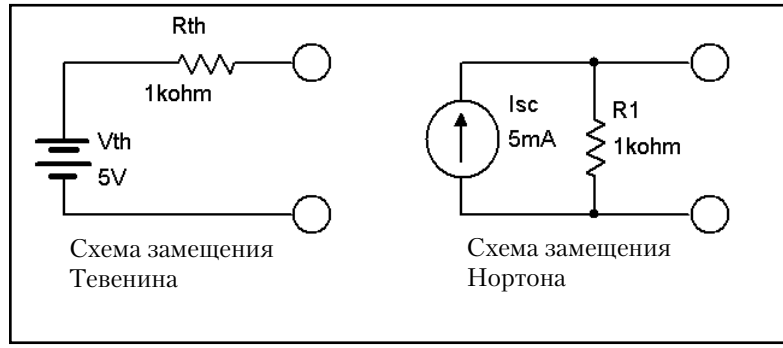


Как видим, ток в схеме короткого замыкания равен **5.000** мА.

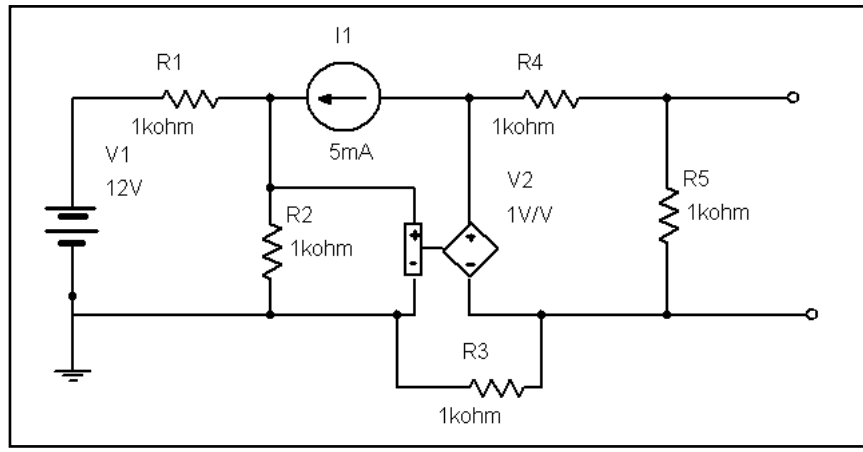
Теперь можно определить сопротивление схемы замещения по теореме Тевенина путем деления напряжения холостого хода на ток короткого замыкания:

$$R_{th} = V_{OC} / I_{SC} = 5{,}000 \text{ В} / 5{,}00 \text{ мА} = 1000 \text{ Ом}.$$

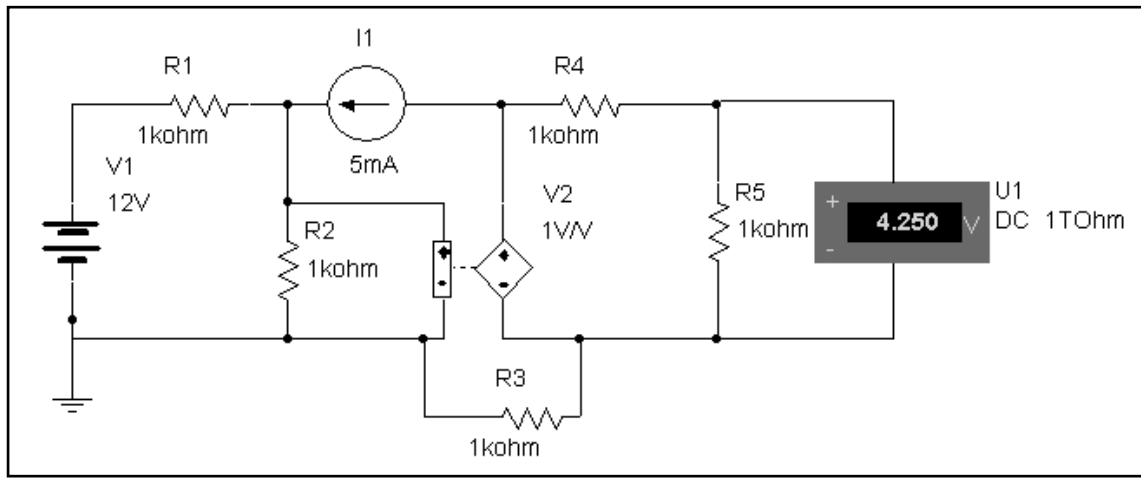
Схемы замещения по теоремам Нортона и Тевенина показаны ниже:

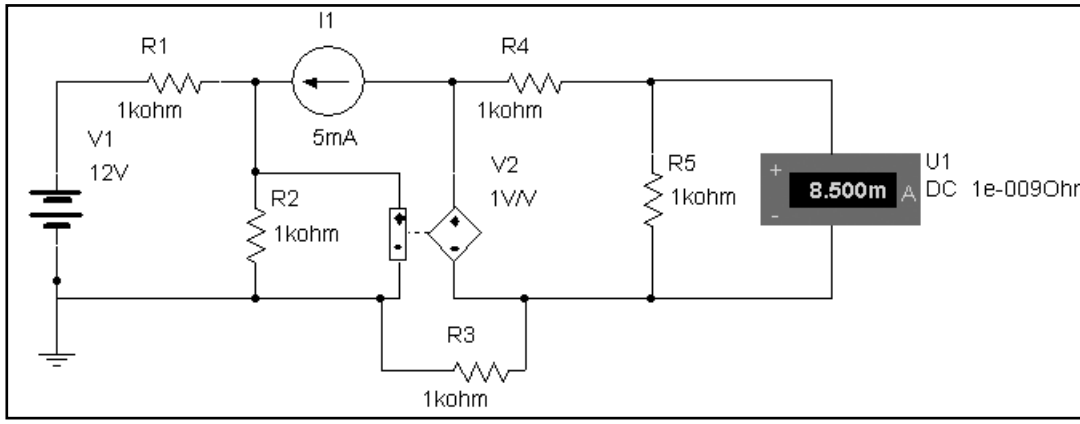


УПРАЖНЕНИЕ 3-10: Найдите эквивалентные схемы замещения Тевенина и Нортона:



РЕШЕНИЕ: V_{OC} = 4,25 В, I_{SC} = 8,5 мА, R_{th} = 500 Ом. Используйте нижеприведенные схемы:

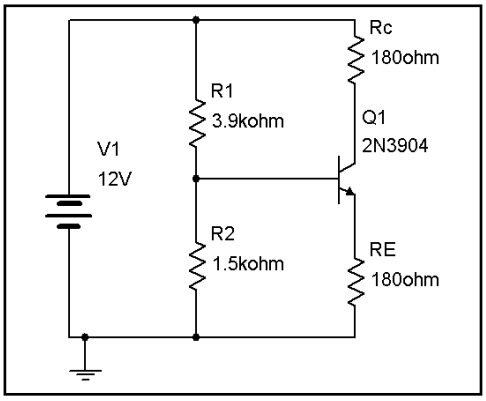




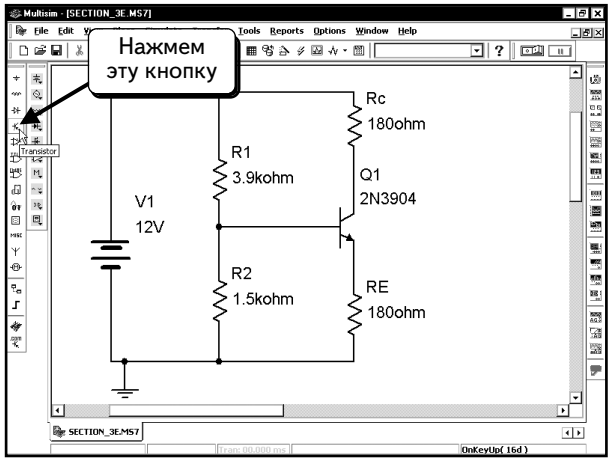
3.5. Рабочая точка транзистора

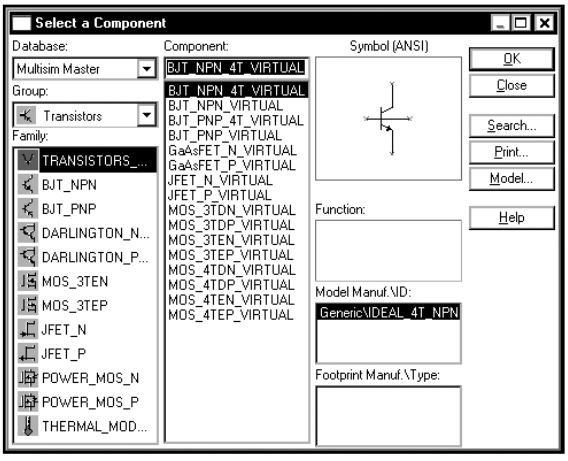
При моделировании схемы транзистора в первую очередь надо проверить рабочую точку транзистора (или рабочую точку транзистора на постоянном токе). Если она выбрана неправильно, результаты всех анализов будут ошибочными. Если вы считаете, что результат какого-либо анализа не соответствует действительности, проверьте рабочую точку. Когда программа Multisim находит рабочую точку, она замещает все конденсаторы разрывами, а все катушки индуктивности замыкает накоротко.

В этом примере найдем рабочую точку для биполярного транзистора NPN BJT. Данная процедура может быть использована и для транзисторов PNP BJT, jFET или MOSFET. Опишем два способа демонстрации данных: с помощью таблицы или в отдельном окне модели. Для анализа воспользуемся следующей схемой:

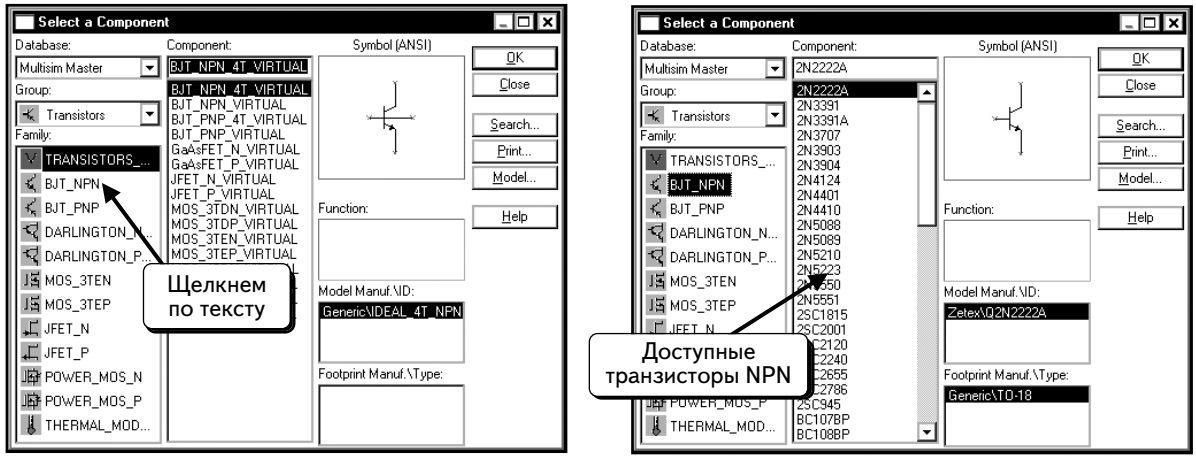


Транзистор 2N3904 находится в группе **Transistors (Транзисторы)**. Нажмем кнопку **Transistor** :



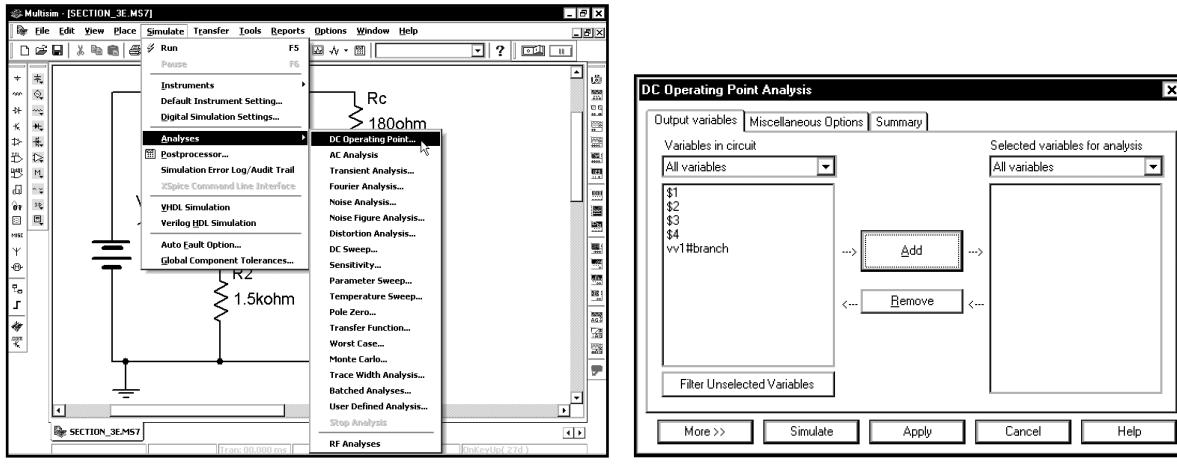


Группа **Transistors** разделена по различным типам транзисторов. Компонент 2N3904 — это биполярный транзистор BJT. Выберем семейство транзисторов **BJT_NPN**:

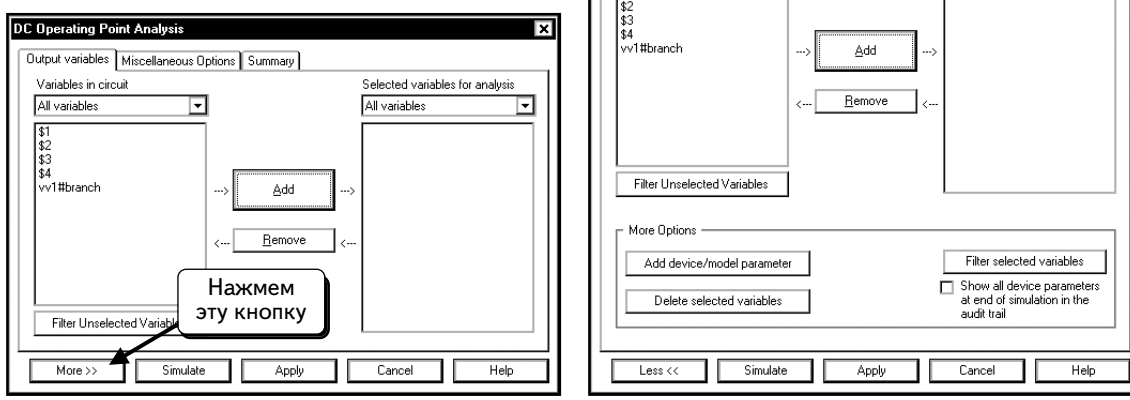


В диалоговом окне появился список доступных транзисторов BJT. Выберем транзистор **2N3904** и нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент в схему. Закончив создание схемы, перейдем к процедуре, которая описана далее.

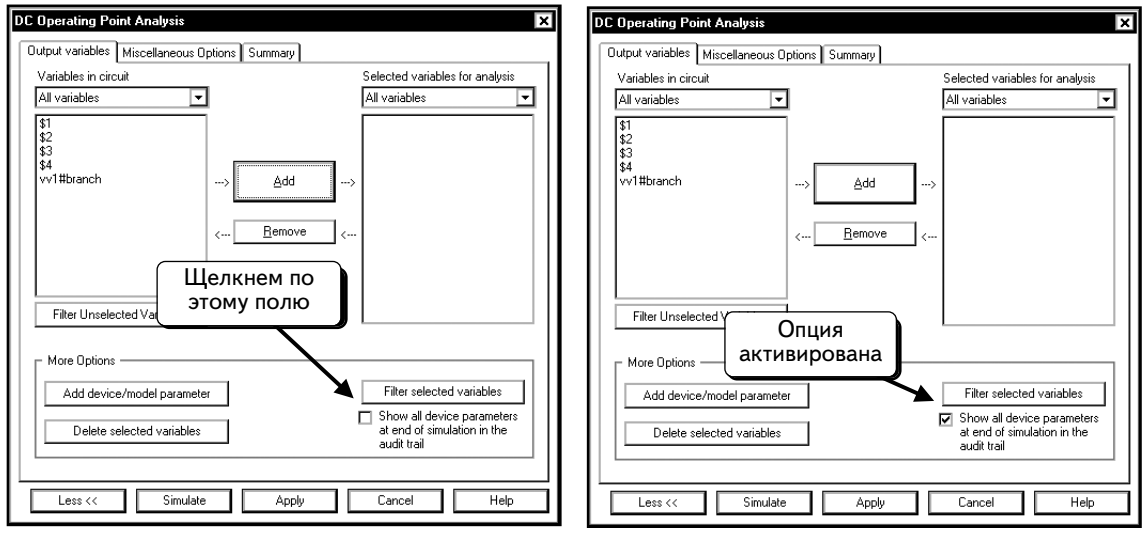
Сначала надо выбрать в качестве типа моделирования анализ рабочей точки. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Analyses ⇒ DC Operating Point (Моделировать ⇒ Анализы ⇒ Рабочая точка DC)**:



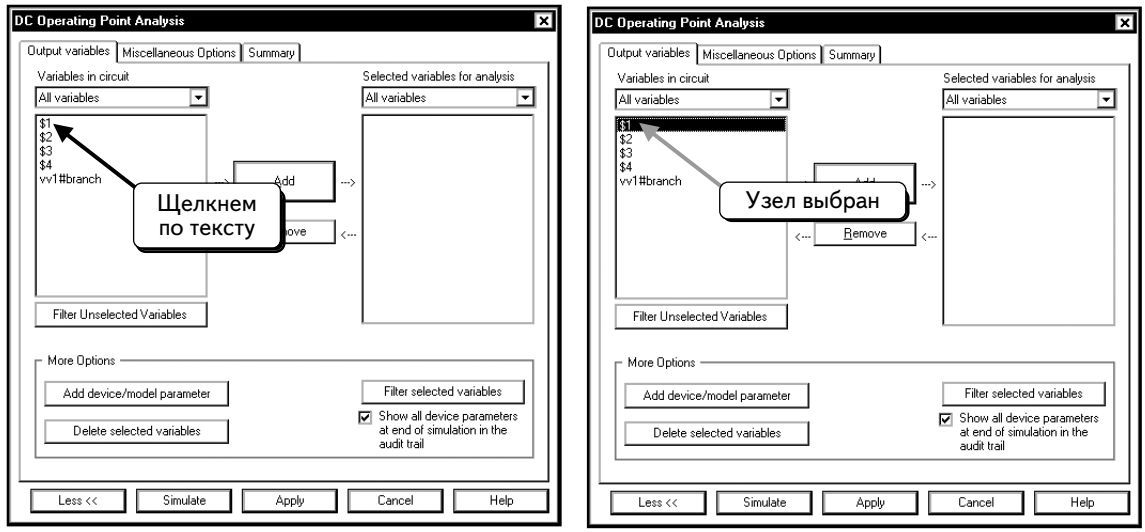
Продемонстрируем первый метод отображения рабочей точки с помощью таблицы (audit trail). Нажмем кнопку **More >> (Далее)**:



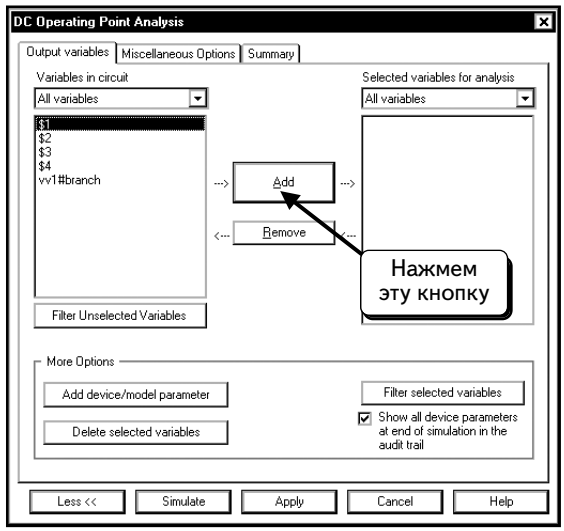
Следует включить опцию ***Show all device parameters at end of simulation in the audit trail*** **(После моделирования показать все параметры устройств в виде таблицы)**. Щелкнем по пустому полю рядом с опцией ☐ . В поле появится галочка ☑ :

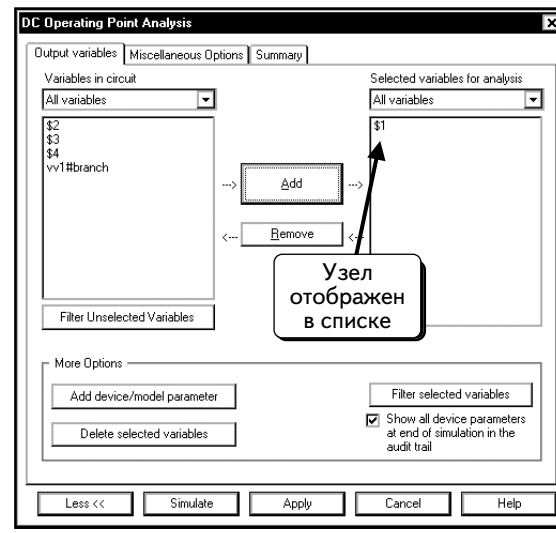


Несмотря на то, что нам не нужна информация о напряжениях узлов, надо указать любую выходную переменную, чтобы выполнить моделирование. Щелкнем по переменной **$1**, как показано:

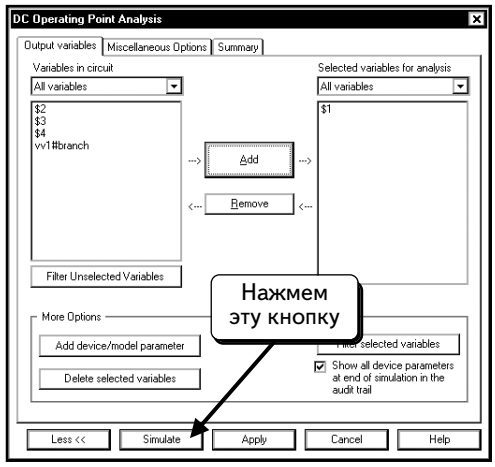


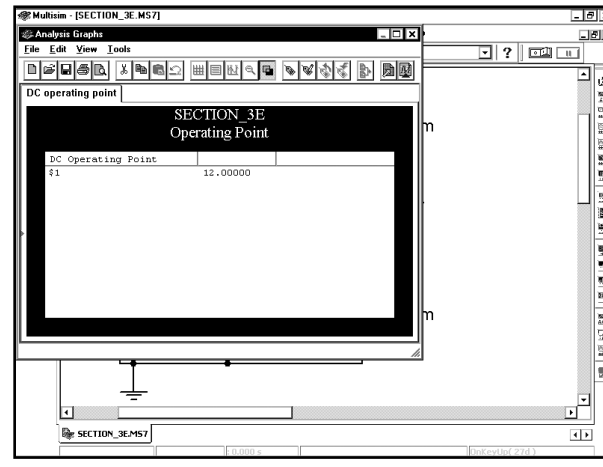
Нажмем кнопку ***Add***, чтобы добавить напряжение на узле в список выходных переменных, которые будут отображены во время моделирования:



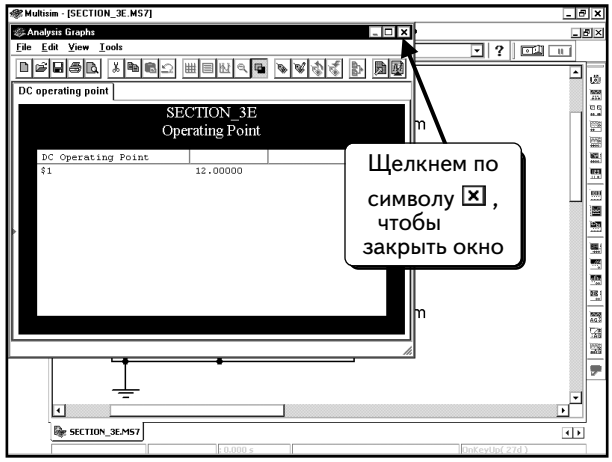


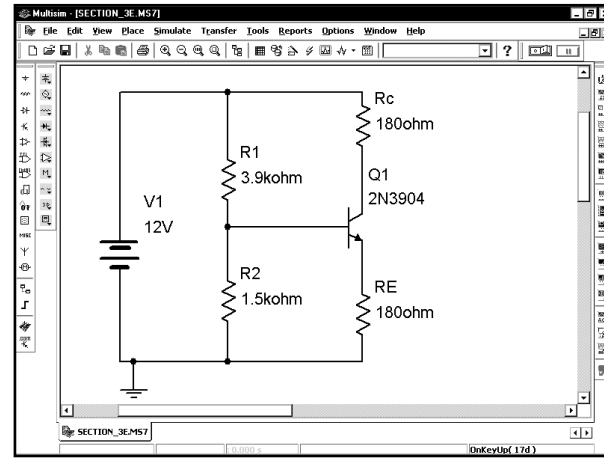
Выходная переменная появилась в списке, и можно выполнить моделирование. Нажмем кнопку **Simulate**:



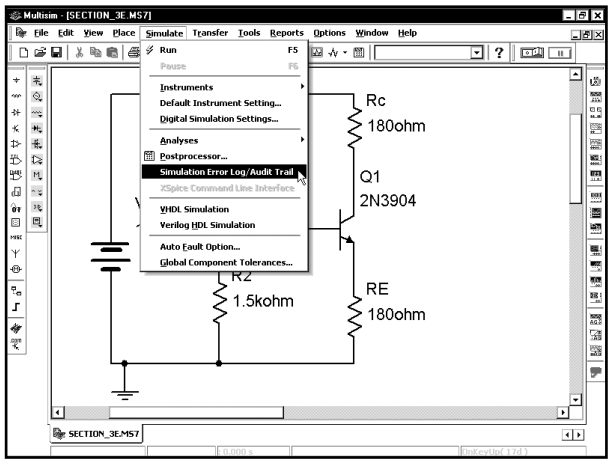


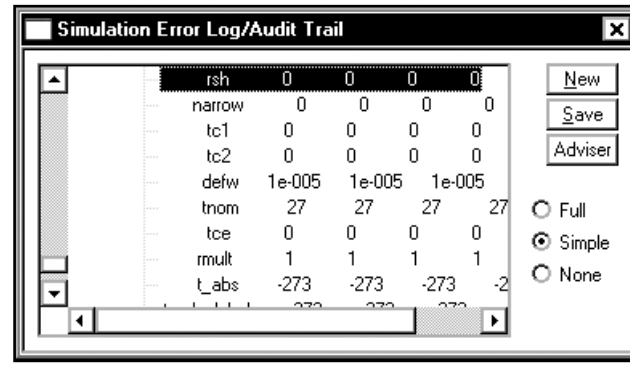
Откроется новое окно с результатами моделирования, в котором показано только значение постоянного напряжения на узле **$1**. Нужная нам информация отображается в виде таблицы, поэтому можно закрыть это окно. Щелкнем по символу ⊠ в верхнем правом углу окна:



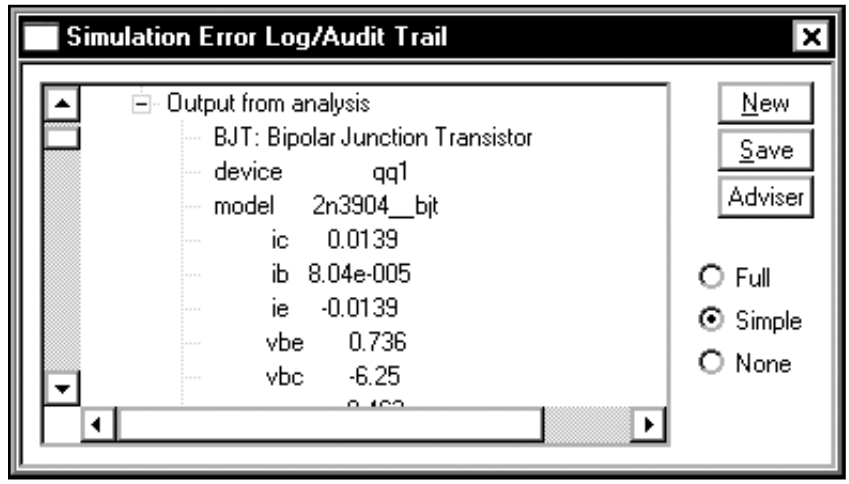


Чтобы просмотреть таблицу, выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Simulation Error Log/Audit Trail (Моделировать ⇒ Журнал ошибок моделирования/Таблица)**:



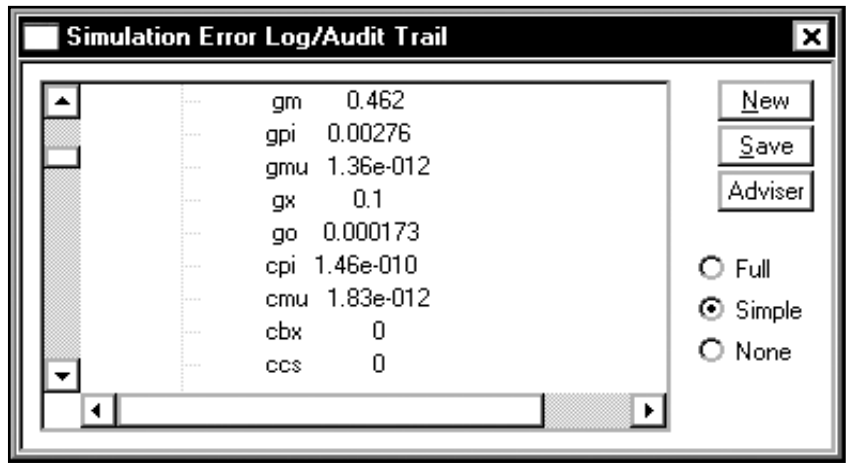


Просмотрим таблицу и найдем записи о компоненте BJT:

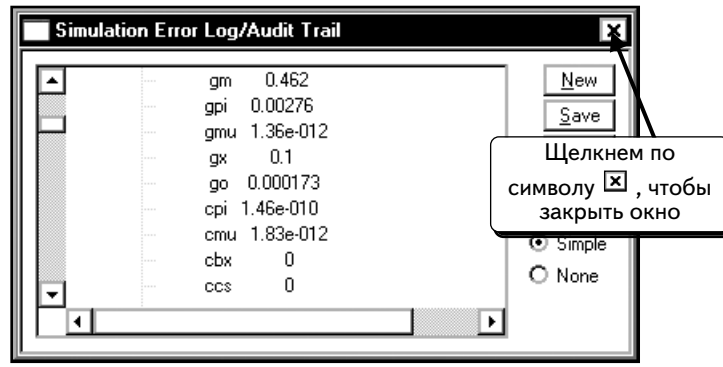


Как видим, ток коллектора (**ic**) равен –13,9 мА, ток базы (**ib**) — 80,4 мкА, напряжение **vbe** составляет 0,736 В, а **Vbc** равно – 6,25 В. Напряжение Vce показано неправильно, но можно вычислить его по формуле: –Vbc + Vbe и получить значение 6,986 В.

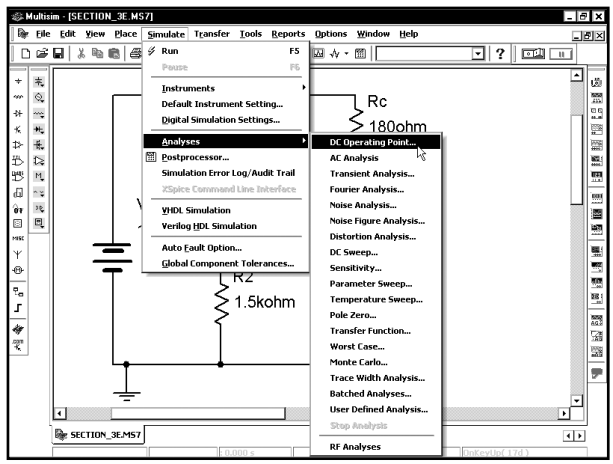
Если просмотреть список, то можно увидеть *g*-параметры для малосигнальной гибридной П-образной модели:

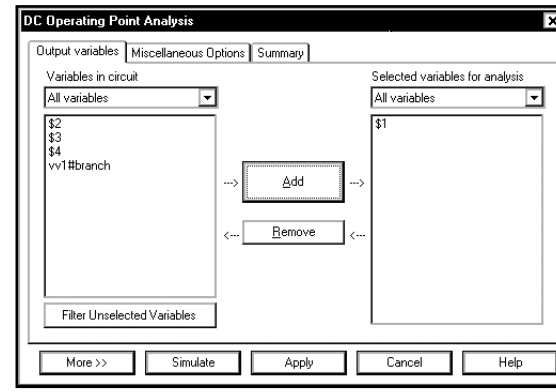


В П-образной модели обычно используются сопротивления: $r_\pi = 1/$**gpi**, $r_0 = 1/$**go**, $r_x = 1/$**gx** и $r_\mu = 1/$**gmu** (соответствующие проводимости приведены в таблице). Таблица содержит дополнительные сведения, которые сейчас рассматриваться не будут. Щелкнем по символу в верхнем правом углу ☒ , чтобы закрыть окно:

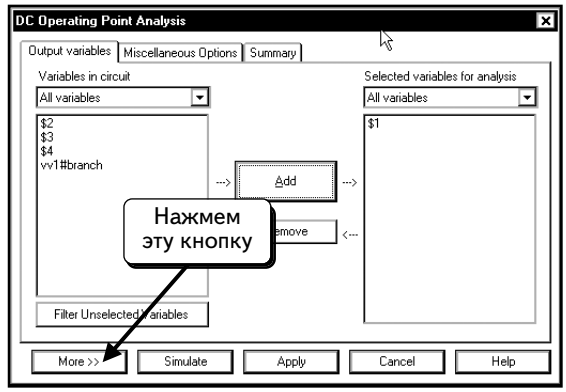


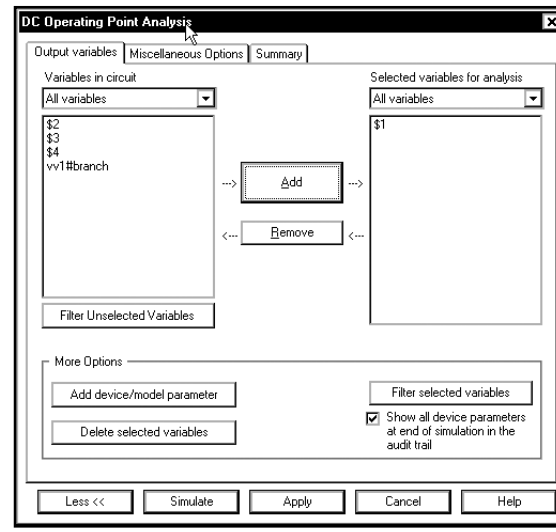
Выполним теперь анализ рабочей точки DC, при котором результаты отображаются с помощью другого метода. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Operating Point**:



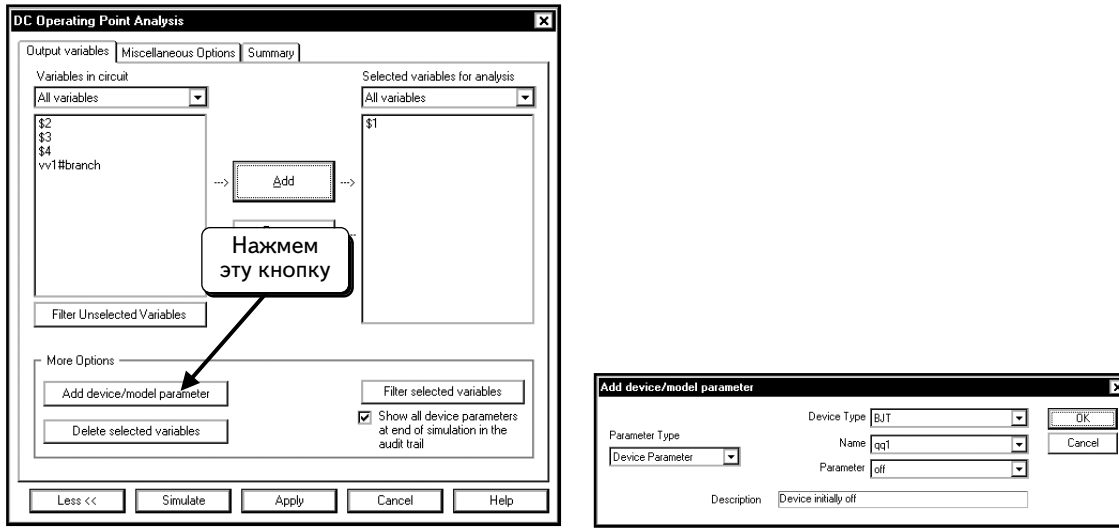


В последнем упражнении был выбран узел **$1**. При желании можно его удалить. Нам надо отобразить токи и напряжения транзистора, а также некоторые малосигнальные параметры, которые определяются во время моделирования рабочей точки на постоянном токе, но не отражаются пока в диалоговом окне. Для этого необходимо добавить эти параметры в диалоговое окно. Нажмем кнопку **More >>**:

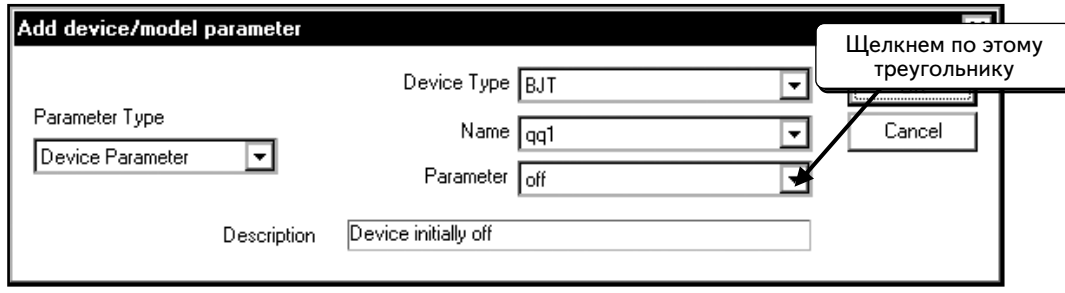




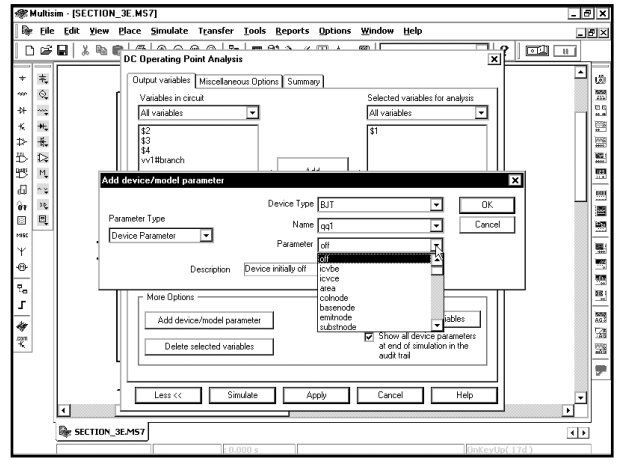
Нажмем кнопку **Add Device/Model Parameter (Добавить параметр устройства/модели)**:



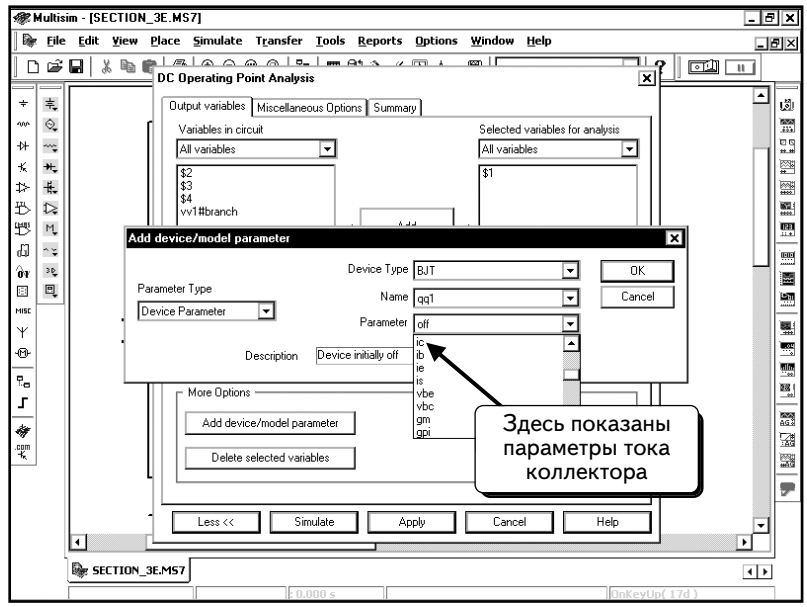
В этой схеме имеется только один транзистор BJT, поэтому в диалоговом окне он будет выбран и помечен как **qq1**. Можно отобразить параметры модели или компонента. Параметр модели — это, например, ток насыщения диода или коэффициент усиления транзистора . В качестве примера параметра компонента можно привести ток коллектора транзистора или напряжение база-эмиттер. Будем работать с токами и напряжениями транзисторов, а также с некоторыми малосигнальными параметрами, которые рассчитываются в процессе определения рабочей точки. По умолчанию данное диалоговое окно отображает параметры компонента **qq1**, поэтому достаточно просто выбрать нужные параметры. Щелкнем по символу в виде треугольника , как показано:



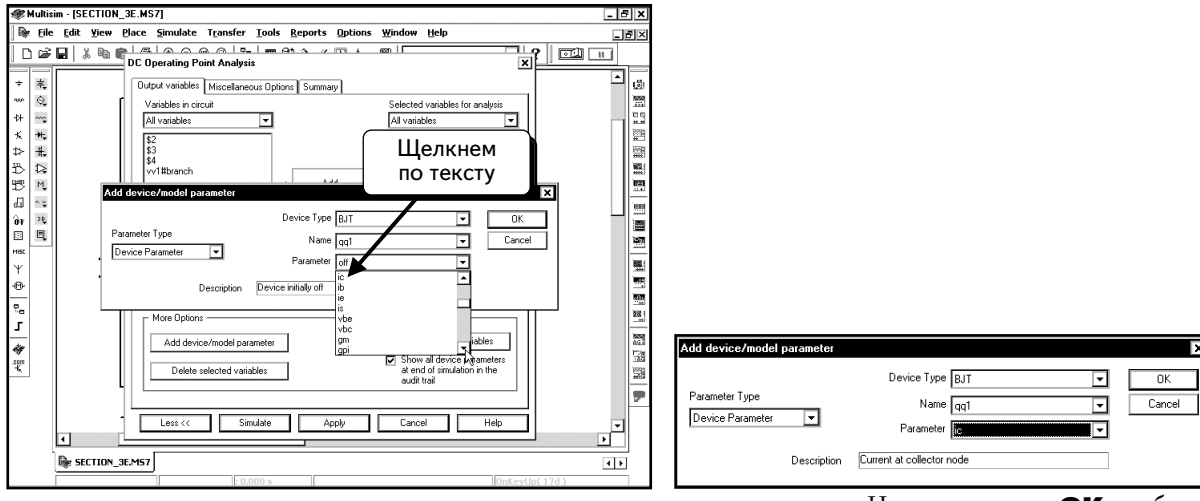
Откроется список параметров компонента:



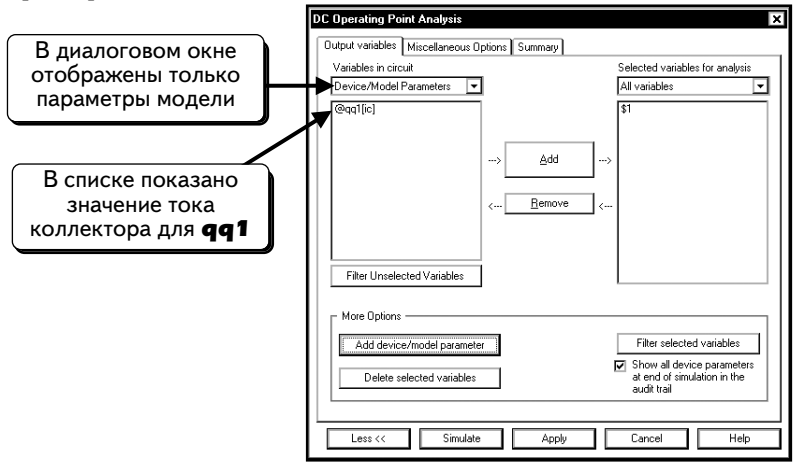
Найдем параметр **ic**. Это — ток коллектора транзистора:



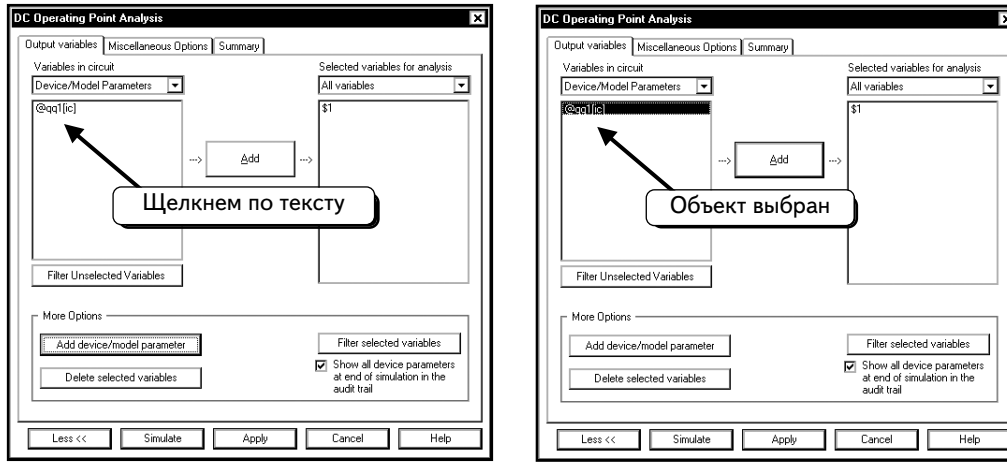
Появилось несколько интересующих нас параметров. Теперь щелкнем по пункту **ic**:



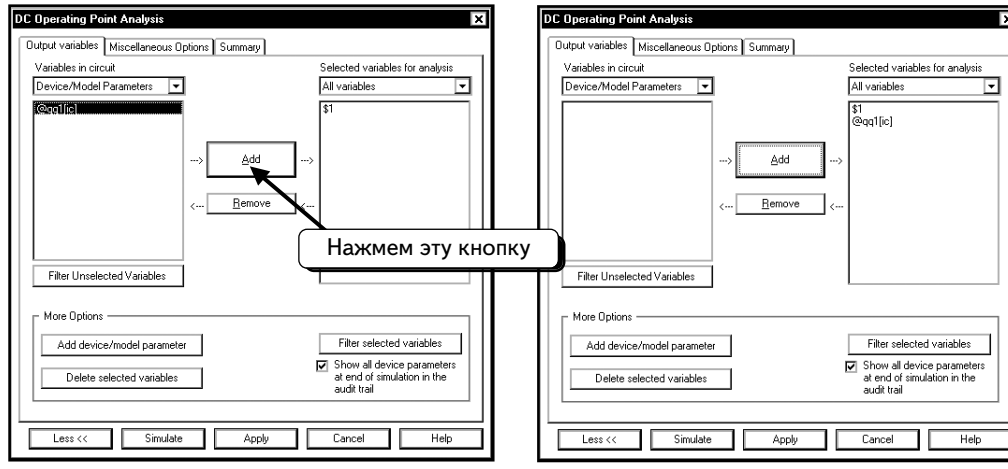
В диалоговом окне указано, что этот параметр соответствует току коллектора. Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить параметр в список:



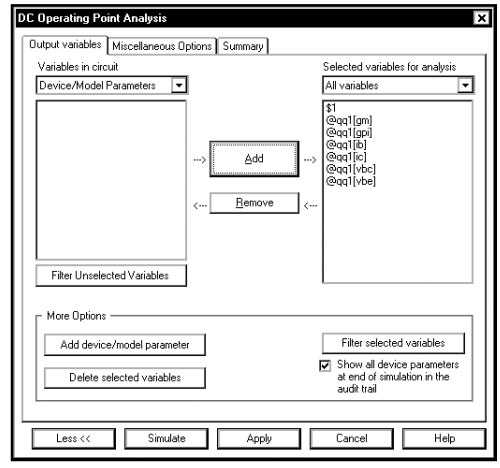
Теперь ток коллектора (**qq1**) появился в списке, но мы пока не указали, что он должен быть отражен на экране после моделирования. Щелкнем по пункту **@qq1[ic]**, чтобы он был показан:



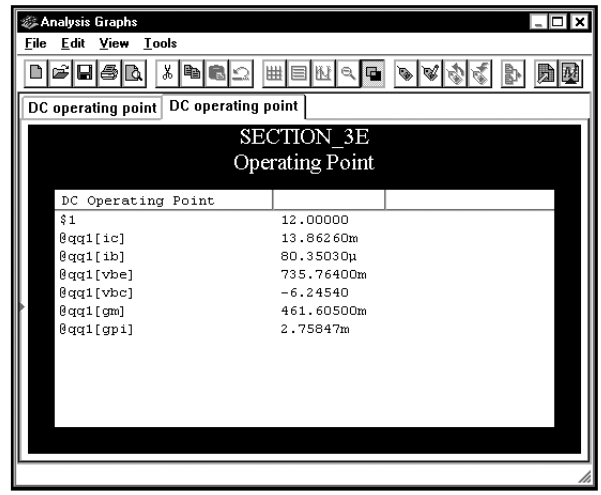
Щелкнем по кнопке ***Add***:



Теперь после выполнения анализа рабочей точки будет показано значение тока коллектора . Повторим процедуру, чтобы показать значение тока базы, а также значения Vbe, Vbc, gpi и gm для транзистора:

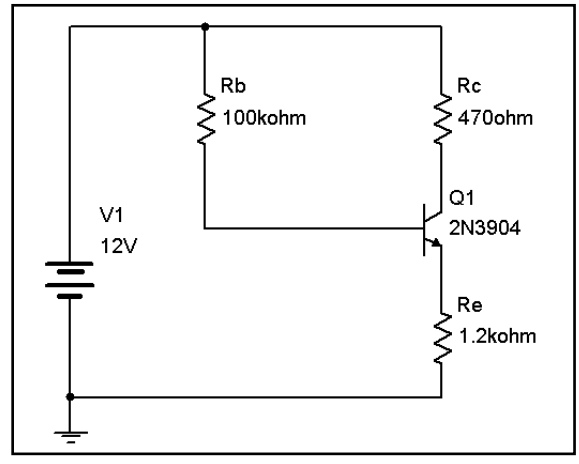


Теперь мы готовы к моделированию. Нажмем кнопку ***Simulate*** — результаты отобразятся в окне ***Analysis Graphs* (Графики анализа)**:

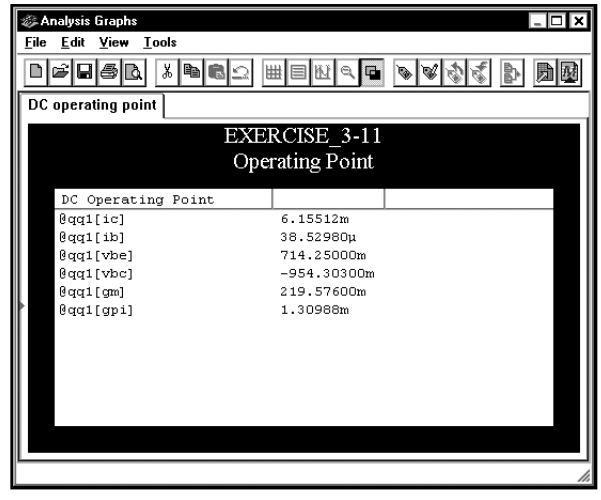


Они соответствуют значениям, которые были в таблице.

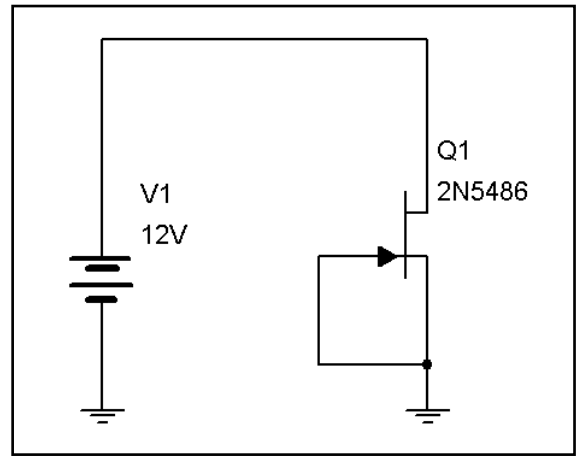
УПРАЖНЕНИЕ 3-11: Выполните анализ рабочей точки DC для следующей схемы. Отобразите значения тока коллектора, тока базы, Vbc, Vbe, gpi и gm для компонента BJT:



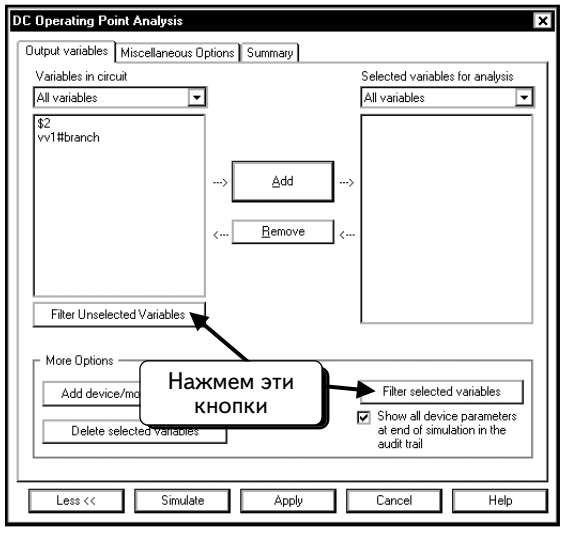
РЕШЕНИЕ:

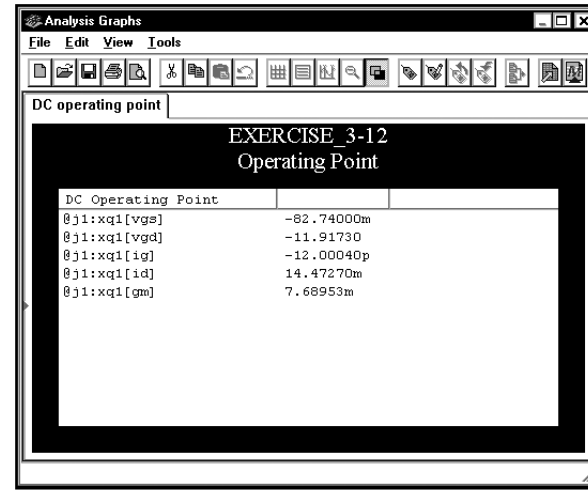


УПРАЖНЕНИЕ 3-12: Выполните анализ рабочей точки DC для следующей схемы. Отобразите значения тока стока, тока затвора, Vgs, Vgd и gm для компонента jFET:



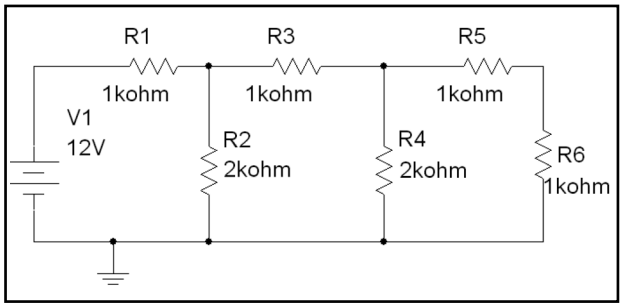
РЕШЕНИЕ: Нажмите кнопку ***Filter Unselected Variables*** **(Фильтровать переменные, которые не были выбраны)**. Активируйте все опции. Это необходимо сделать, так как модель 2N5486 представляет собой вложенную схему. Обычно значения параметров вложенных схем скрыты:





3.6. Задачи

Задача 3.1. Воспользовавшись индикаторами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме, показанной ниже:



Задача 3.2. Воспользовавшись мультиметрами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.3. Воспользовавшись анализом SPICE DC Operating Point, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.4. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность, рассеиваемую резистором R6 в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.5. Воспользовавшись индикаторами, определите ток через каждый резистор в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.6. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность, рассеиваемую резисторами R4, R5 и R6 в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.7. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность источника питания V1 в схеме из задачи 3.1.

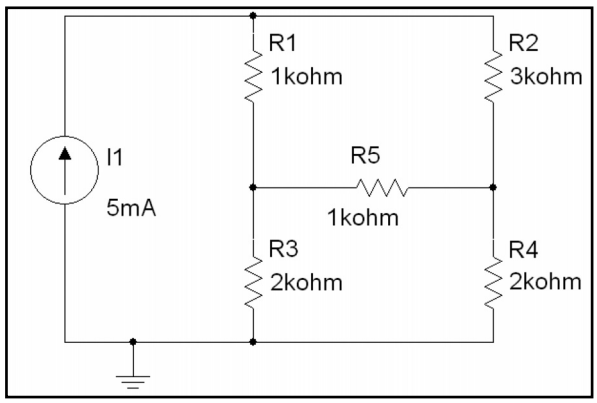
Задача 3.8. Воспользовавшись индикаторами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R2 в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.9. Воспользовавшись мультиметрами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R4 в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.10. Воспользовавшись индикаторами, покажите, что второй закон Киргхофа выполняется для всех трех контуров схемы из задачи 3.1.

Задача 3.11. Воспользовавшись индикаторами, покажите, что ток через резистор R1 равен сумме токов через резисторы R2 и R3 (подтвердите первый закон Киргхофа) в схеме из задачи 3.1.

Задача 3.12. Воспользовавшись индикаторами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме, показанной ниже:



Задача 3.13. Воспользовавшись мультиметрами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.14. Воспользовавшись анализом SPICE DC Operating Point, определите напряжение на каждом узле в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.15. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность, рассеиваемую резистором R5 в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.16. Воспользовавшись индикаторами, определите ток через каждый из резисторов в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.17. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность, рассеиваемую резистором R4 в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.18. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность источника тока I1 в схеме из задачи 3.12.

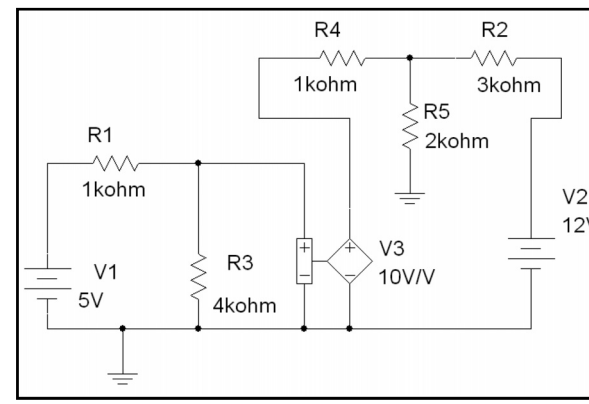
Задача 3.19. Воспользовавшись индикаторами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R2 в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.20. Воспользовавшись мультиметрами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R4 в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.21. Воспользовавшись индикаторами, покажите, что второй закон Киргхофа выполняется для всех трех контуров схемы в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.22. Воспользовавшись индикаторами, покажите, что ток источника I1 равен сумме токов через резисторы R1 и R2 (подтвердите первый закон Киргхофа) в схеме из задачи 3.12.

Задача 3.23. Воспользовавшись индикаторами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме, показанной ниже:



Задача 3.24. Воспользовавшись мультиметрами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R3 в схеме из задачи 3.23.

Задача 3.25 Воспользовавшись анализом SPICE DC Operating Point, определите напряжения каждого узла в схеме из задачи 3.23.

Задача 3.26. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность, рассеиваемую резистором R5 в схеме из задачи 3.23.

Задача 3.27. Воспользовавшись индикаторами, определите ток через каждый резистор в схеме из задачи 3.23.

Задача 3.28. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность, рассеиваемую резистором R4 в схеме из задачи 3.23.

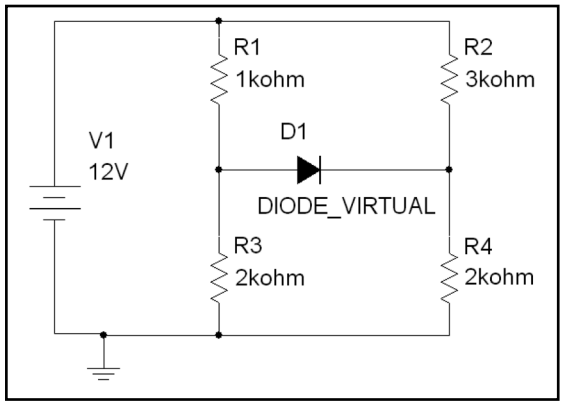
Задача 3.29. Воспользовавшись ваттметром, определите мощность источника питания V1 в схеме из задачи 3.23.

Задача 3.30. Воспользовавшись индикаторами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R2 в схеме из задачи 3.23.

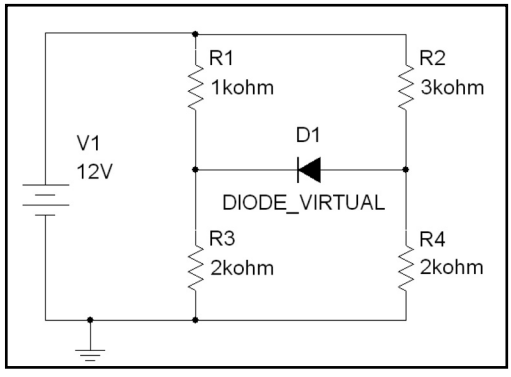
Задача 3.31. Воспользовавшись мультиметрами, определите напряжения на узлах и ток через резистор R4 в схеме из задачи 3.23.

Задача 3.32. В схеме, использованной в разделе 3.3, определите напряжение и ток диода при условии, что ток насыщения диода равен 10^{-13}, 10^{-14}, 10^{-15} и 10^{-16} А. Нарисуйте от руки графики и сравните их с графиками зависимостей тока диода от тока насыщения и напряжения диода от тока насыщения.

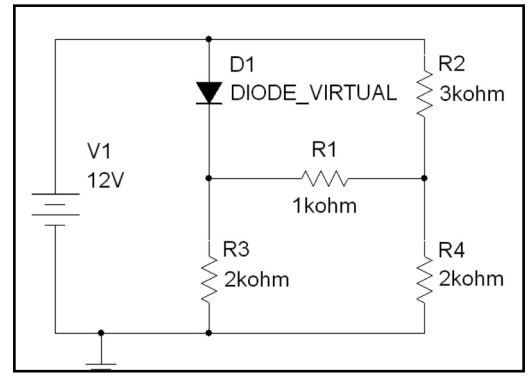
Задача 3.33. Определите ток и напряжение диода для схемы, показанной ниже:



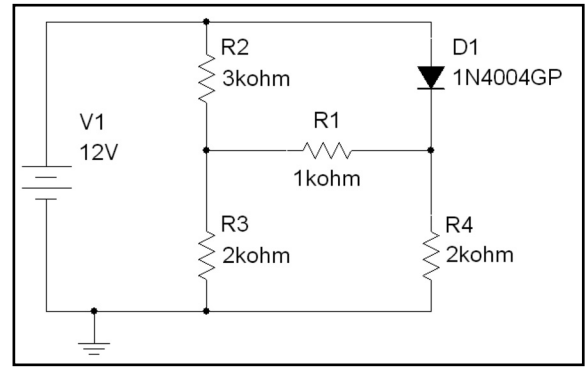
Задача 3.34. Определите ток и напряжение диода для схемы, показанной ниже:



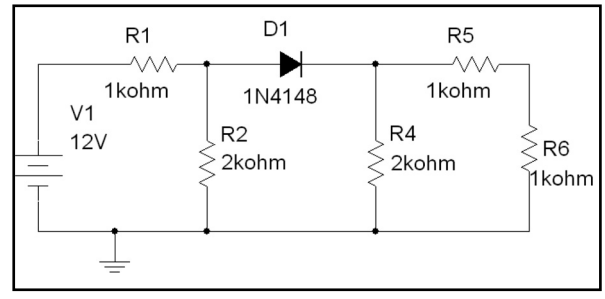
Задача 3.35. Определите ток и напряжение диода для схемы, показанной ниже:



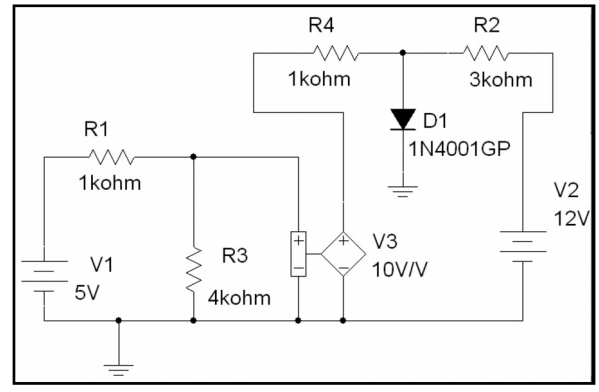
Задача 3.36. Определите ток и напряжение диода для схемы, показанной ниже:



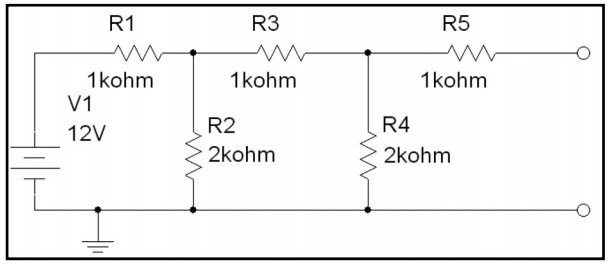
Задача 3.37. Определите ток и напряжение диода для схемы, показанной ниже:



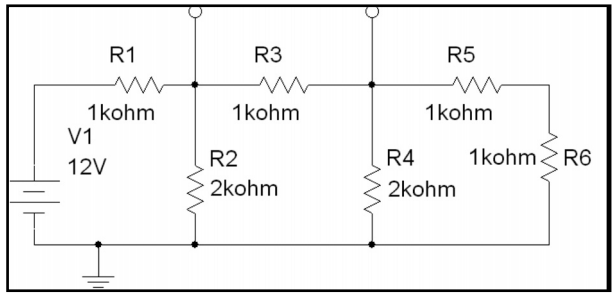
Задача 3.38. Определите ток и напряжение диода для схемы, показанной ниже:



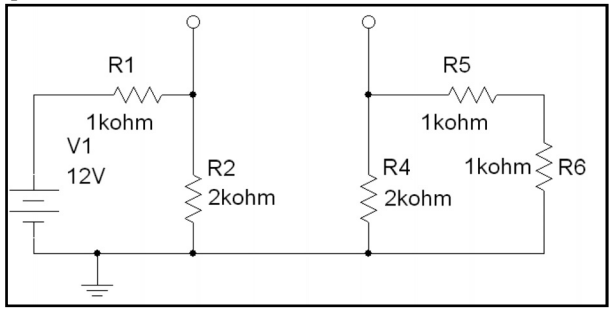
Задача 3.39. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



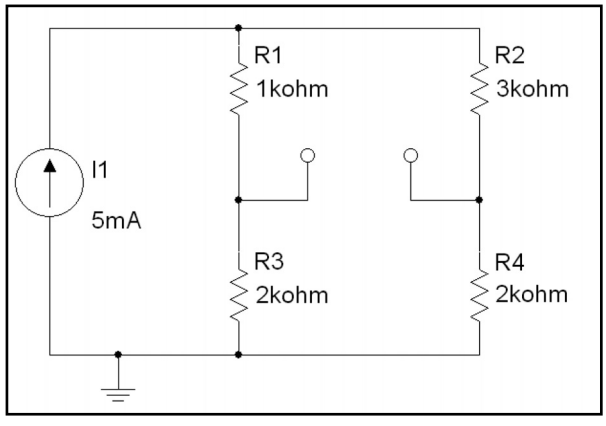
Задача 3.40. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



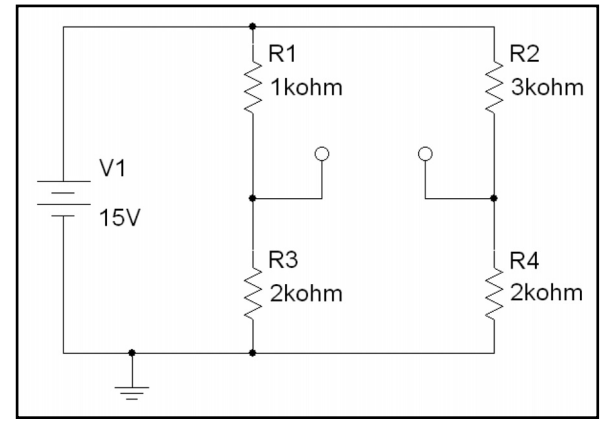
Задача 3.41. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



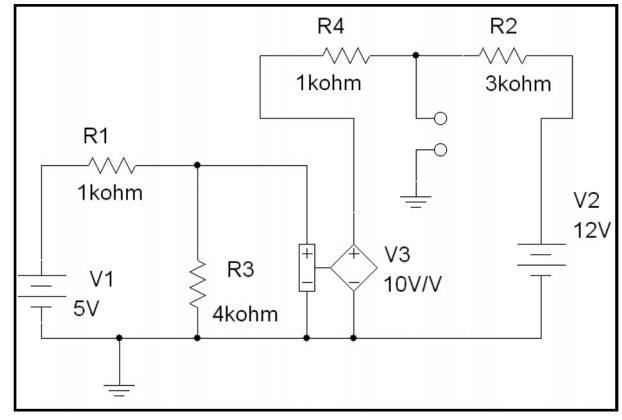
Задача 3.42. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



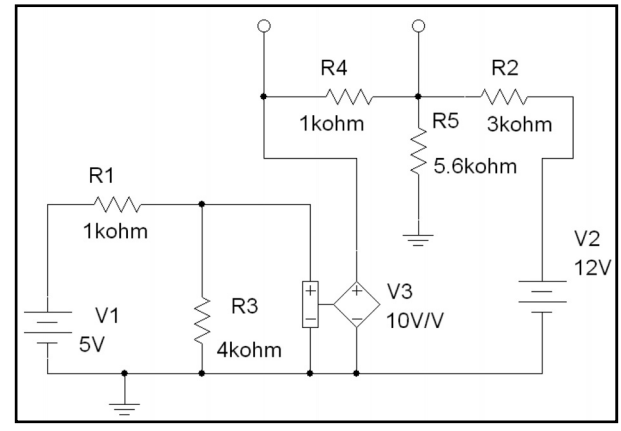
Задача 3.43. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



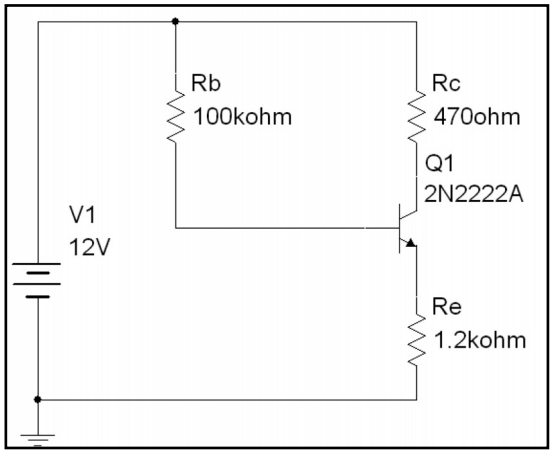
Задача 3.44. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



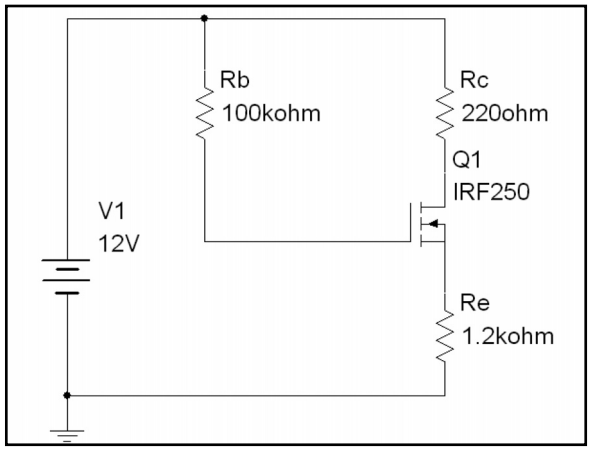
Задача 3.45. Найдите схему замещения по теореме Тевенина относительно показанных полюсов в схеме, приведенной ниже:



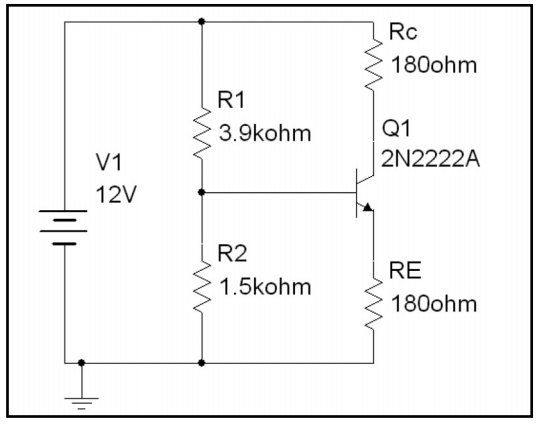
Задача 3.46. Определите рабочую точку транзистора I_C и V_{CE} в схеме, показанной ниже:



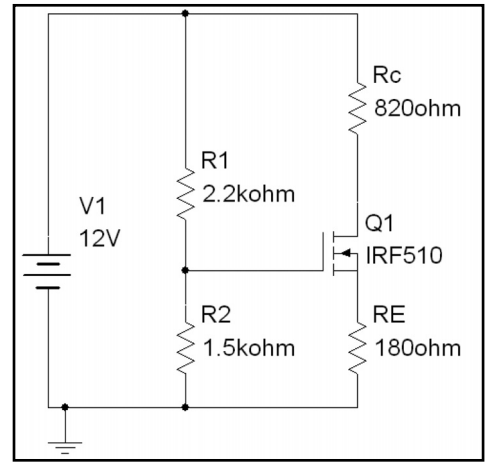
Задача 3.47. Определите рабочую точку транзистора I_D и V_{DS} в схеме, показанной ниже:



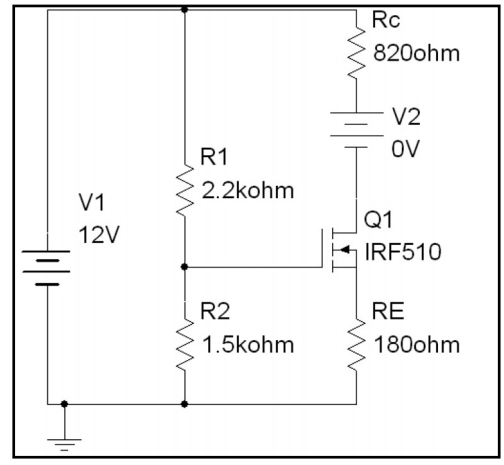
Задача 3.48. Определите рабочую точку транзистора I_C и V_{CE} в схеме, показанной ниже:



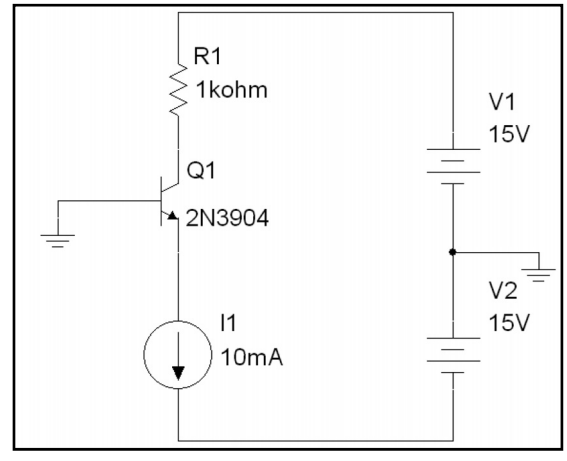
Задача 3.49. Определите рабочую точку транзистора I_D и V_{DS} в схеме, показанной ниже:



Подсказка: можно добавить источник постоянного тока с напряжением 0 В, чтобы упростить расчет тока стока:



Задача 3.50. Определите рабочую точку транзистора I_C и V_{CE} в схеме, показанной ниже:



ГЛАВА 4

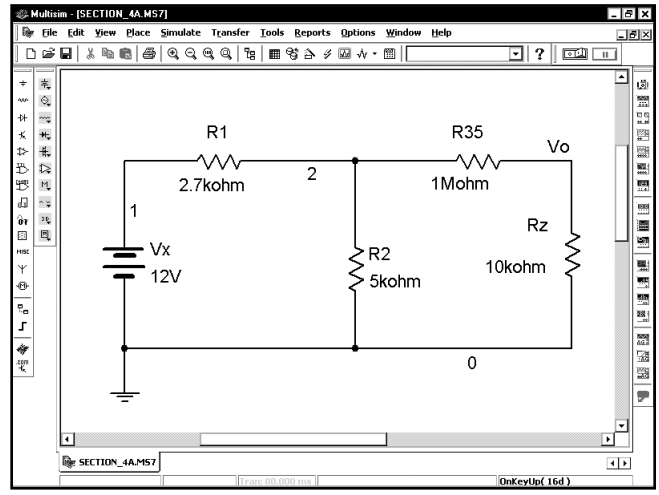
Вариации на постоянном токе

Функцию DC Sweep (Вариация на постоянном токе) можно использовать, чтобы определить напряжение и ток для любого компонента схемы. Анализ DC Sweep схож с анализами, которые описаны в главе 3, однако имеет ряд отличительных особенностей. В частности, при анализе DC Sweep в течение одного сеанса моделирования можно проводить анализ для ряда значений входного напряжения (или входного тока) источника. Например, при использовании анализа рабочей точки DC на схеме, показанной на с. 123, можно получить результаты только для одного значения: Vx = 15 В. При любом изменении значений следует повторять моделирование. Если же использовать функцию **DC Sweep**, то можно проводить моделирование для различных значений Vx в течение одного сеанса. Например, с помощью этого анализа можно определить, какое будет напряжение на узлах при изменении напряжения источника, а также как будет изменяться коллекторный ток биполярного транзистора BJT при изменении питающего напряжения. Как и при анализе напряжения на узлах, предполагается, что все конденсаторы представляют собой разрыв, а все катушки индуктивности замкнуты накоротко.

Отметим важную особенность этой главы: все примеры моделирования, которые будут здесь показаны, могут быть выполнены только с помощью функции **DC Sweep**. В главе 3 было отмечено, что можно использовать моделирование рабочей точки DC, чтобы получить тот же результат, который был достигнут при измерениях с помощью индикаторов тока и напряжения или мультиметров. В разделе «Анализ переменного тока» вы увидите, что можно получить одинаковые результаты с помощью функции **AC Sweep** или при измерениях, осуществляемых Боде-плоттером. В разделе «Моделирование во временной области» будет применяться осциллограф или функция **Transient Analysis** (**Анализ переходных процессов**). В большинстве других разделов будет выполнен анализ или отображены результаты в программе Postprocessor. Моделирование с помощью функции **DC Sweep** отличается тем, что ни один из стандартных инструментов не позволяет нам получить аналогичные результаты. Таким образом, в этой главе мы не сможем применять для просмотра результатов другие функции или инструменты и будем работать только с функцией **DC Sweep**.

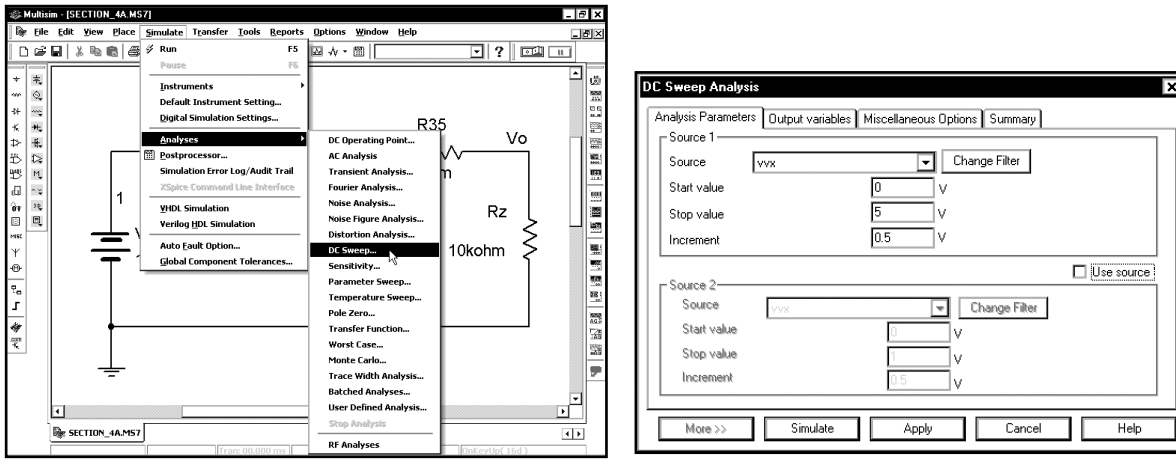
4.1. Основы анализа на постоянном токе

Начнем с изменения схемы, которая рассматривалась в разделе 3.1 (на с. 123):

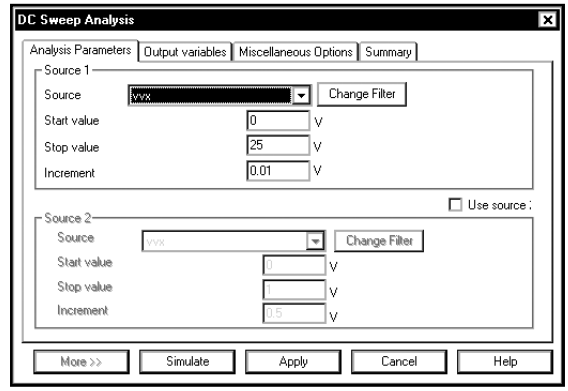


Необходимо выяснить, как будет изменяться напряжение на узле **Vo**, если напряжение **Vx** будет увеличиваться от 0 до 25 В, проходя через ряд фиксированных значений*. Получим также значения тока для различных компонентов. При работе с функцией DC Sweep, все конденсаторы также представляют собой разрыв, а все катушки индуктивности замкнуты накоротко. Настроим функцию DC Sweep. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep** (**Моделировать** ⇒ **Анализы** ⇒ **DC Sweep**):

* В отечественной терминологии нет установившегося термина, соответствующего английскому «sweep», смысл которого мы только что пояснили на конкретном примере. В данном переводе будет применяться термин «вариация», который представляется наиболее близким по смыслу. (*Прим. ред.*)

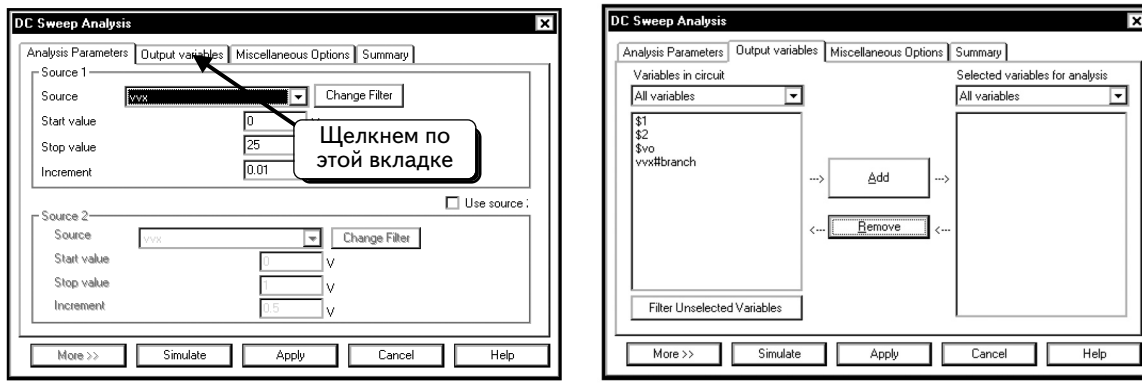


В схеме имеется только один источник постоянного напряжения, поэтому программа Multisim выбирает его для вариации. Обратите внимание: мы назвали источник «**Vx**», а программа Multisim называет его «**vvx**». Это вызвано тем, что в Spice названия источников напряжения должны начинаться с буквы «v». В программе Multisim название источника напряжения может начинаться с любой буквы, так как программа автоматически добавляет префикс «v». Соответствующие префиксы добавляются и в названия других компонентов, например, резисторов, конденсаторов, катушек и источников тока. Мы будем увеличивать значение **Vx** от 0 до 25 В с шагом 0,01 В. Введем данные в диалоговом окне, которое показано ниже:



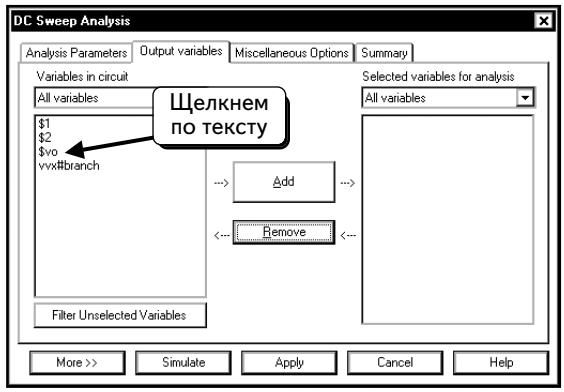
Заметьте, что в схеме имеется только один источник **Source 1**, но при наличии в схеме двух источников можно задавать вариации для обоих (так называемые вложенные вариации — nested sweeps). Пример вложенной вариации показан в разделе 4.4.

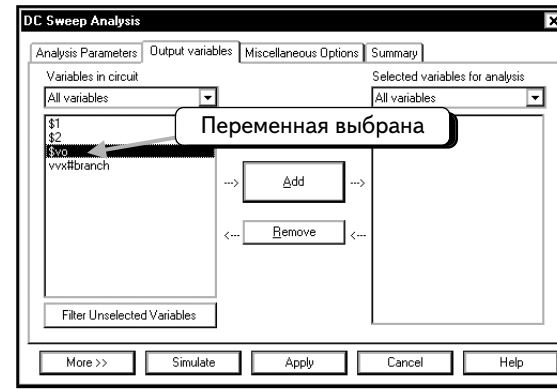
Теперь параметры функции настроены. Перед тем как проводить моделирование, надо указать выходные переменные, которые будут отображаться во время моделирования. Щелкнем по вкладке **Output variables**:



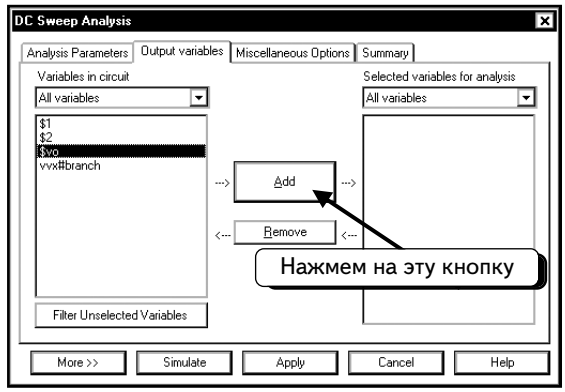
Следует выбрать хотя бы одну переменную. О том, как получать кривые в программе Postprocessor, было рассказано в главе 2. После завершения моделирования можно легко отобразить кривые напряжений на любом узле схемы. Отобразить ток сложнее. Здесь мы покажем, как можно отобразить ток через некоторые резисторы в программе Postprocessor.

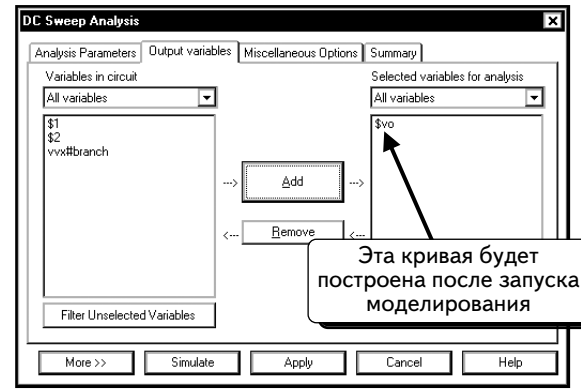
Сначала получим кривую напряжения на узле **Vo**. Для проведения моделирования необходимо выбрать хотя бы одну переменную. Если после его завершения понадобится отобразить другие переменные, можно получить их графики в программе Postprocessor. Щелкнем по переменной **$Vo**, как показано:





Нажмем кнопку **Add**:





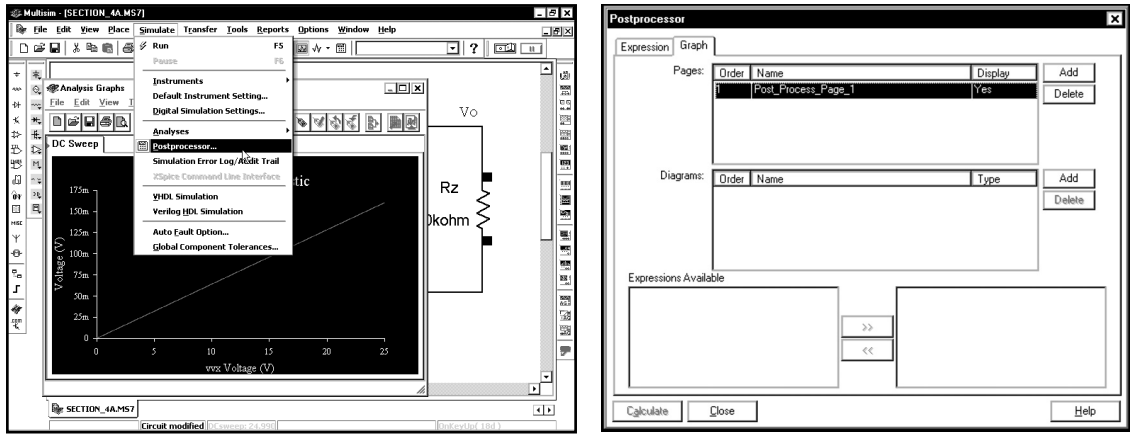
После моделирования будет получен график переменной.

Теперь мы готовы к моделированию. Нажмем кнопку **Simulate**. Откроется окно **Analysis Graphs** (**Графики анализа**), в котором отобразится выбранное напряжение:

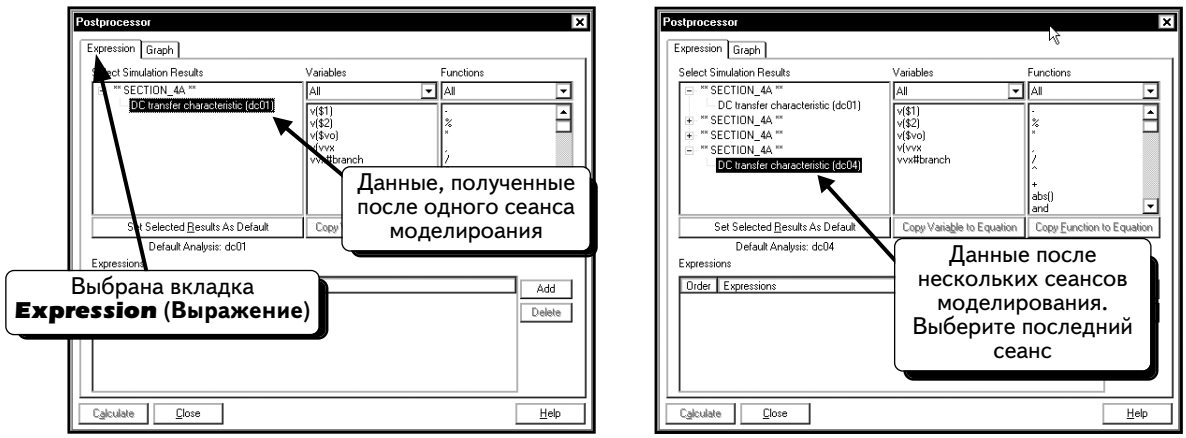


На графике видна зависимость выбранной переменной от варьируемой переменной (в данном примере это — **Vx**):

Теперь можно использовать программу Postprocessor для просмотра напряжения на других компонентах схемы. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Postprocessor,** чтобы открыть окно Postprocessor:

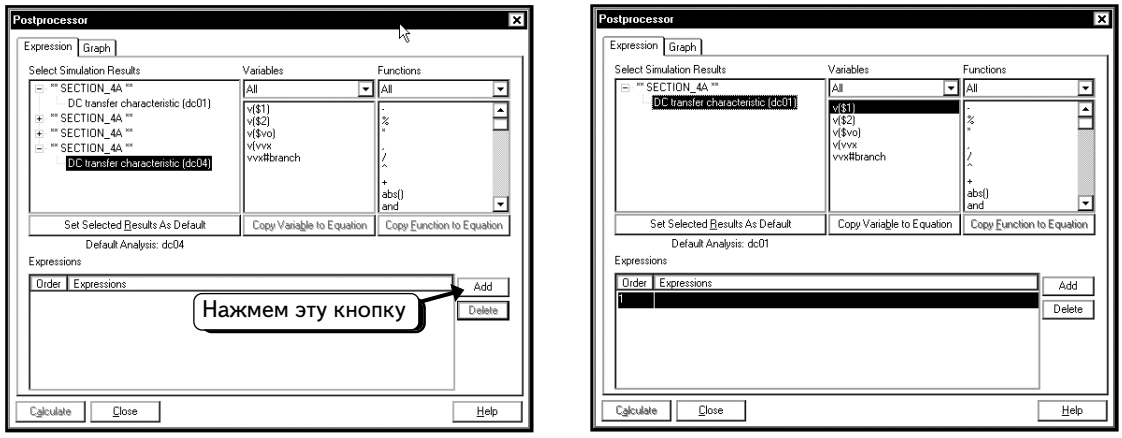


Щелкнем по вкладке **Expression** (**Выражение**):



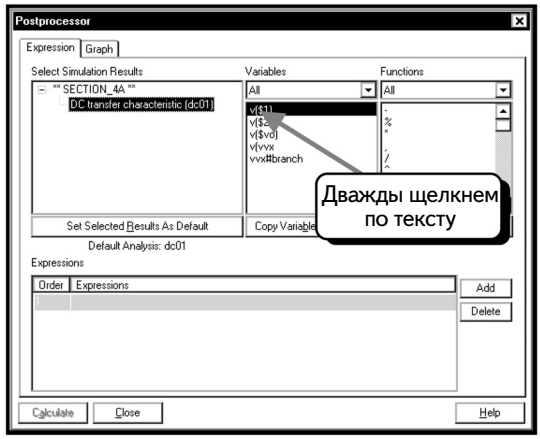
В разделе **Select Simulation Results** (**Выберите результаты моделирования**) приведен список, который включает все сеансы моделирования, выполненные вами в программе Multisim. В данном примере на придыдущем рисунке слева, выполнен только один анализ DC Sweep. Если моделирование повторялось несколько раз либо ранее выполнялись другие анализы, в диалоговом окне будет несколько записей. Например, на экране вверху справа видим список четырех сеансов анализа DC Sweep. Выберем группу данных (как правило, это результаты последнего анализа).

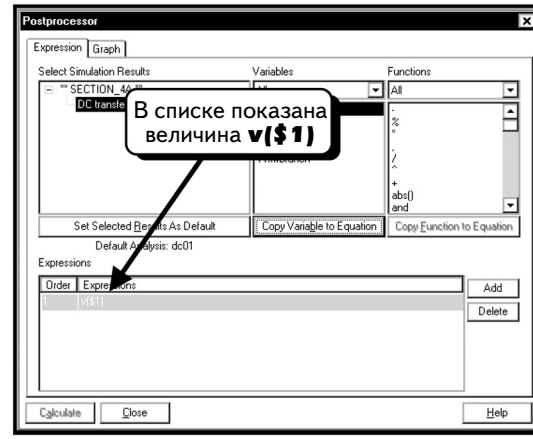
Мы хотим создать график, который отобразит напряжение на узлах 1 и 2. Сначала необходимо добавить данные в программу Postprocessor. Нажмем кнопку **Add**:



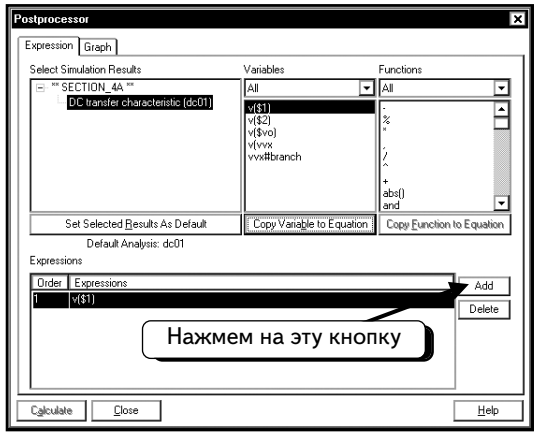
Теперь создадим выражение для графика. В качестве выражений можно использовать только напряжения узлов, например, **v($1)**, **v($2)**, **vo**, а также напряжение источника постоянного тока **Vx** (в диалоговом окне оно помечено как **vvx**). В списке имеется только одно значение тока, это — ток источника напряжения **Vx** (переменная **vvx#branch**). Значения токов через резисторы в списке отсутствуют. Чтобы их отобразить, нужно добавить в схему датчик тока (источник напряжения, управляемый током) или указать интересующий вас ток во время настройки анализа. Позднее в данном разделе будет показано, как это сделать обоими способами. Пока мы ограничимся напряжениями на узлах и током источника.

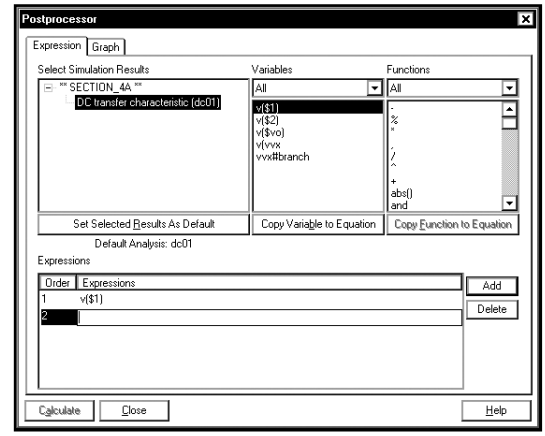
Дважды щелкнем по переменной **v($1)**, чтобы добавить кривую в список:



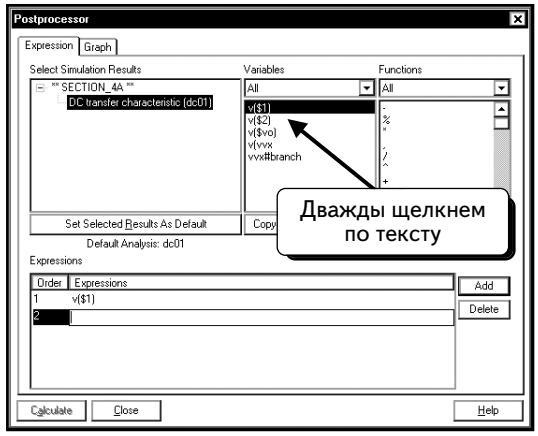


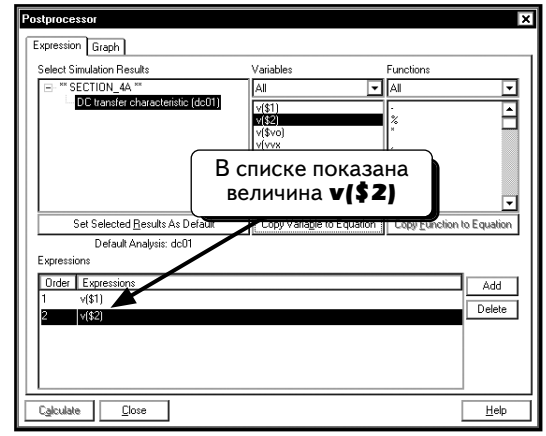
Теперь необходимо создать выражение для напряжения узла 2. Нажмем кнопку **Add**:



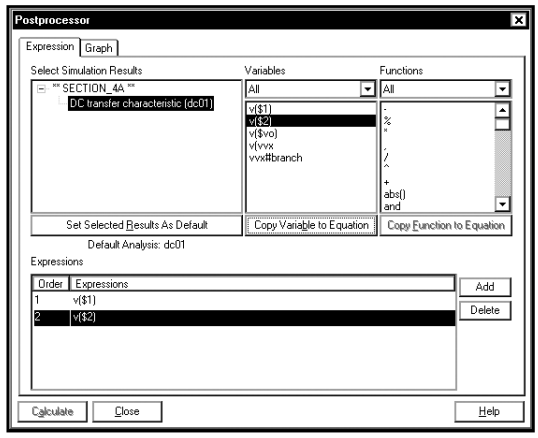


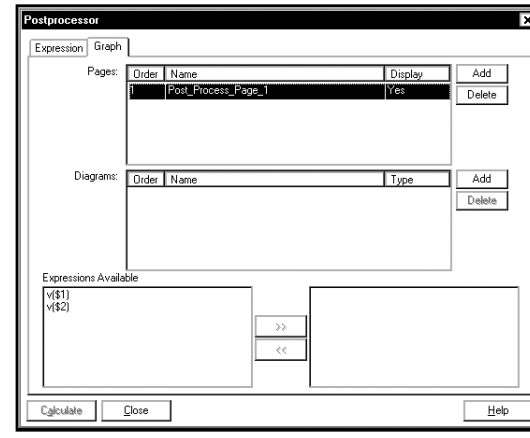
Дважды щелкнем по переменной **v($2)**, чтобы добавить кривую в список:



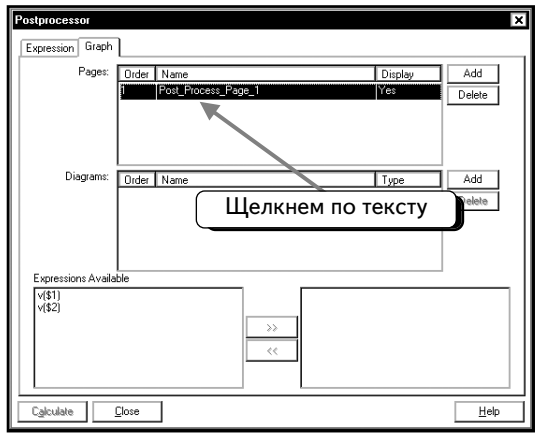


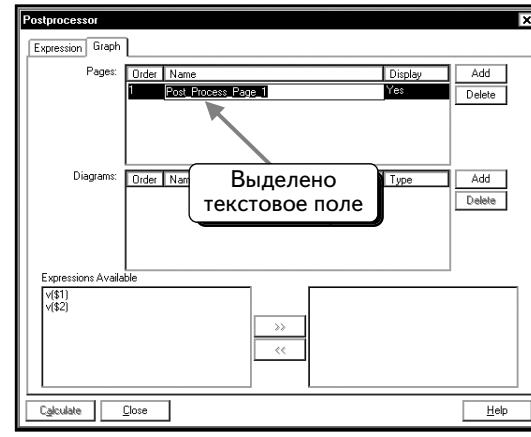
Далее необходимо создать график с кривыми. Щелкнем по вкладке **Graph (График)**:



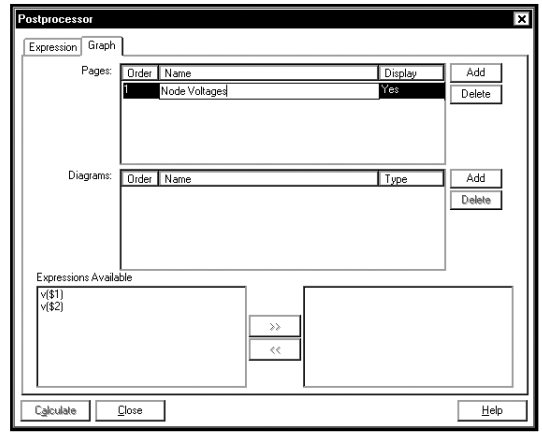


Сначала надо ввести название для графика. Щелкнем по полю **Post_Process_Page_1**, как показано ниже:

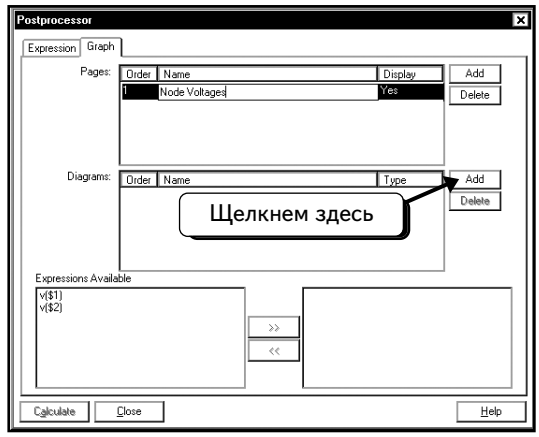


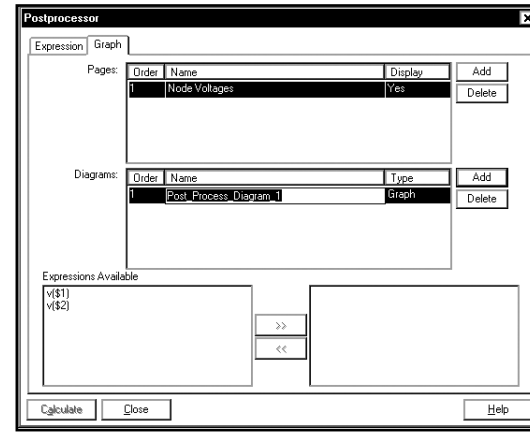


Введем новое название для страницы Grapher. На экране она названа как «**Node Voltages**»:



Теперь добавим на страницу график, нажав кнопку **Add**, как показано ниже:





Введем для этого новое название графика. На экране это также «**`Node Voltages`**»:

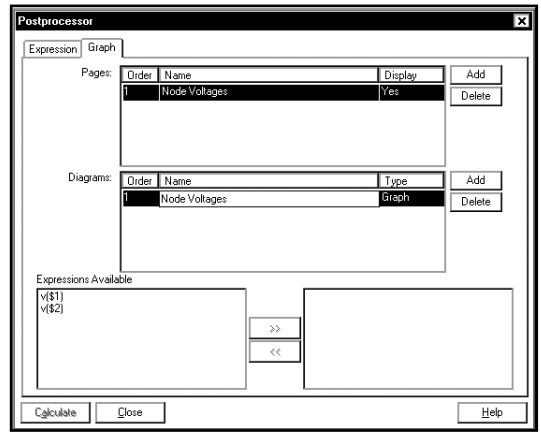
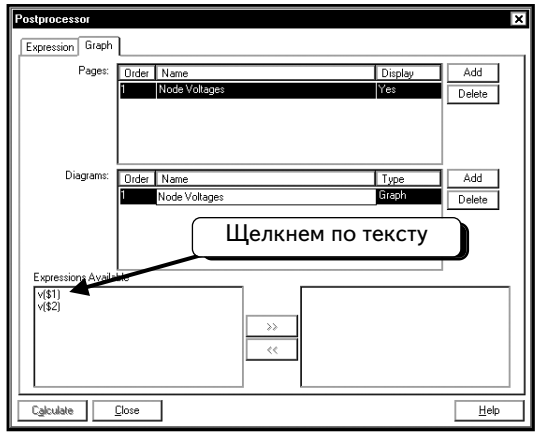
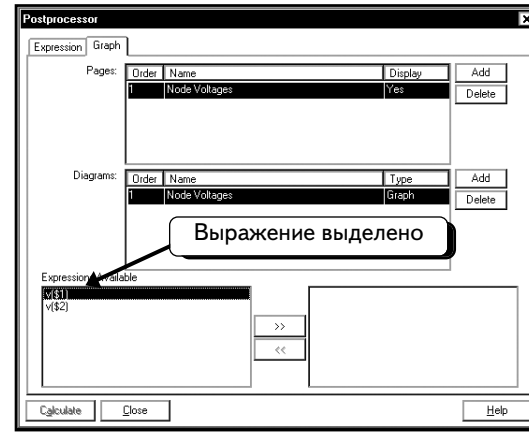
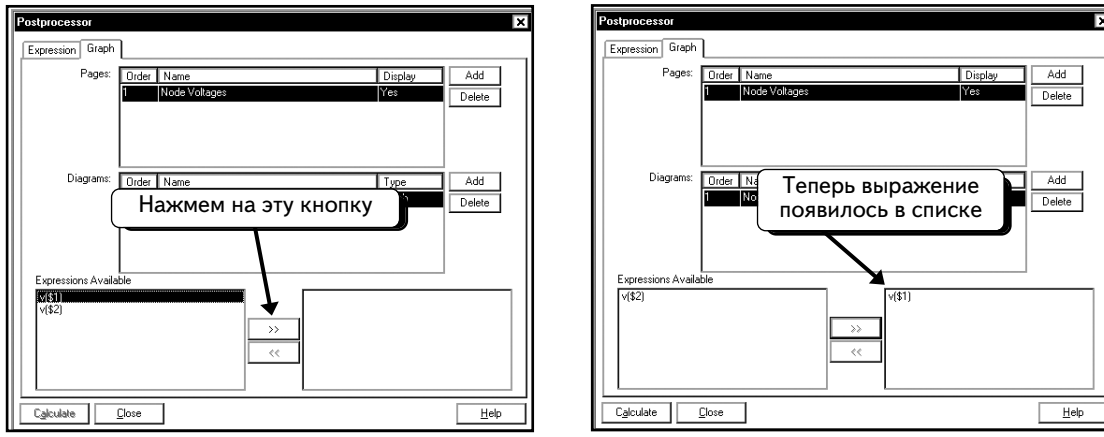


График появился на странице, и теперь можно добавить в него кривые. Щелкнем по выражению **v($1)**, чтобы выделить текст:

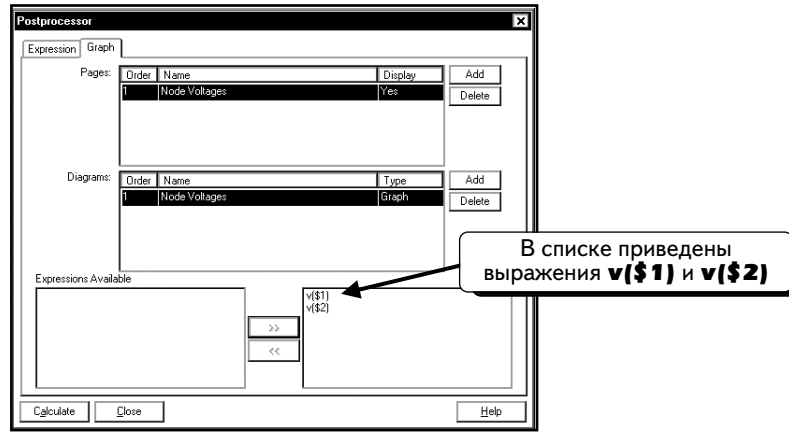




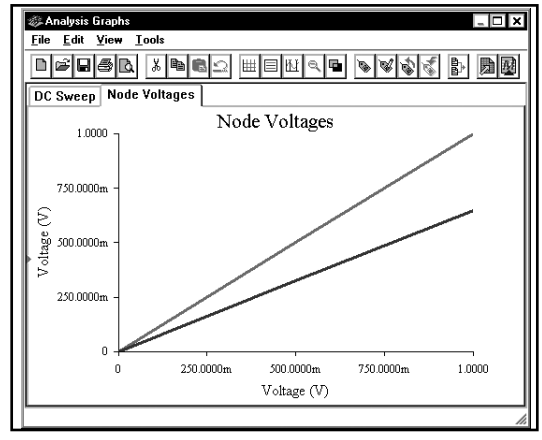
Щелкнем по кнопке , чтобы добавить кривую:



Повторим эту процедуру, чтобы добавить выражение **v($2)** в правое окно:

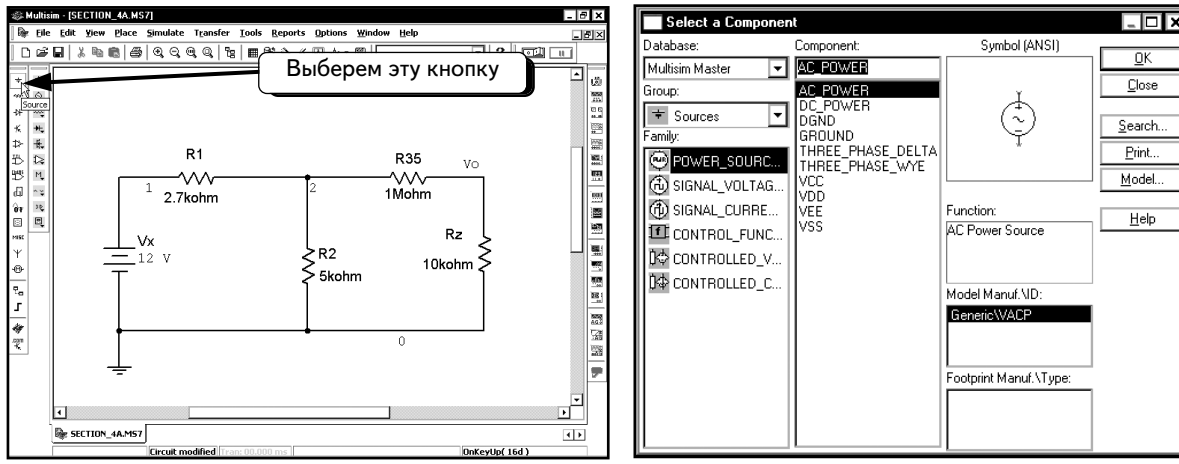


Мы готовы к созданию графиков. Нажмем кнопку **Calculate**, чтобы просмотреть графики и отобразить напряжение на узлах 1 и 2 :

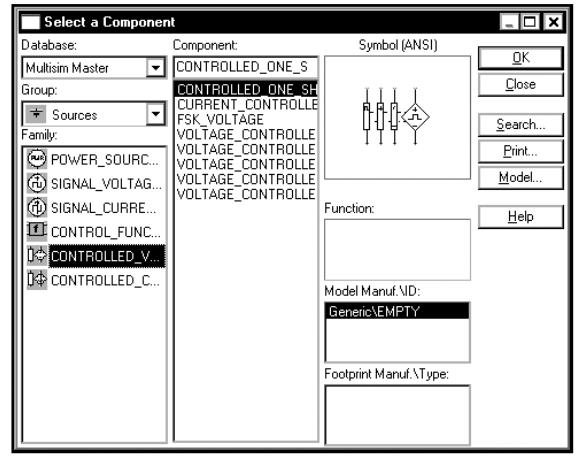


Чтобы отобразить значения тока, нужно добавить в схему источник напряжения или указать интересующий вас ток во время настройки анализа. Здесь будут показаны оба способа. Закроем окно ***Analysis Graphs*** (**Графики анализа**). Для отслеживания значения тока можно поместить в схему источник напряжения, управляемый током, или источник напряжения 0 В, который включен в соответствующую ветвь. Измерим ток через резистор R1 с помощью источника напряжения, управляемого током, а ток на резисторе R35 — с помощью источника напряжения 0 В. Вы уже умеете включать в схему источник постоянного напряжения, поэтому покажем, как включается источник напряжения, управляемый током (***Current Controlled Voltage Source***).

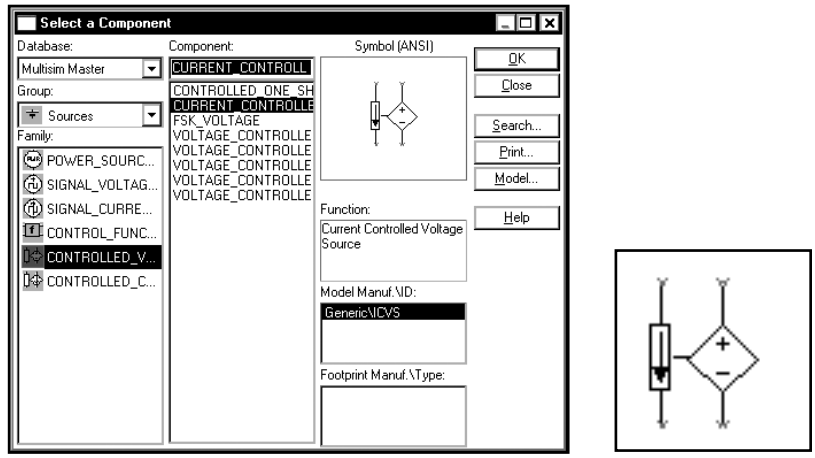
Нажмем кнопку **Source (Источник)**:



Выберем группу **Controlled_Voltage**:

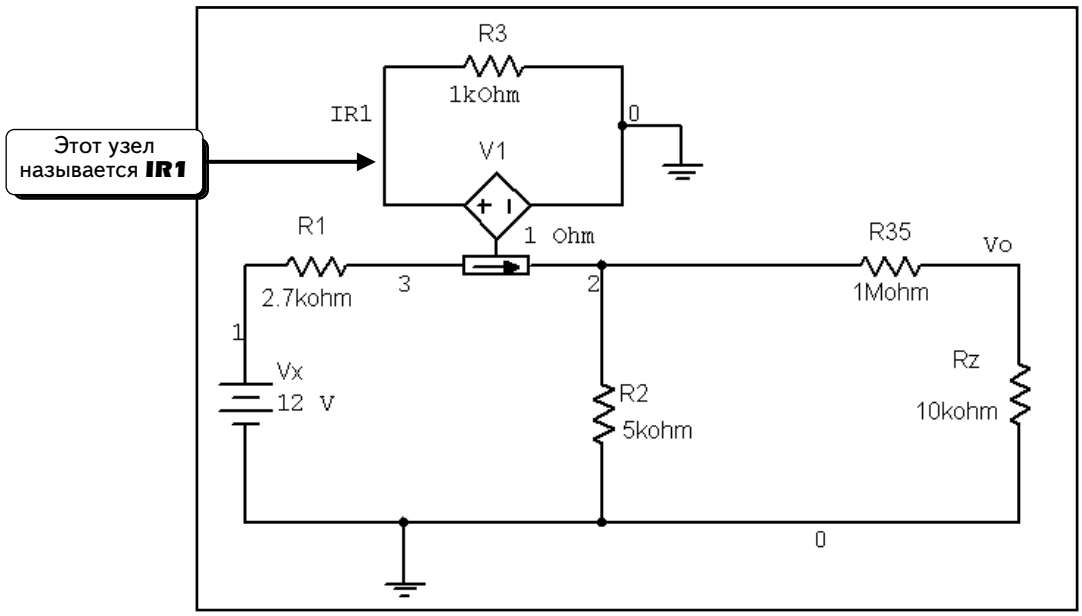


Теперь в диалоговом окне отобразились все доступные источники напряжения. Будем работать с источником напряжения, управляемым током: выберем источник **CURRENT_CONTROLLED (Управляемые током)**. Увеличенное изображение такого источника напряжения показано на рисунке справа:



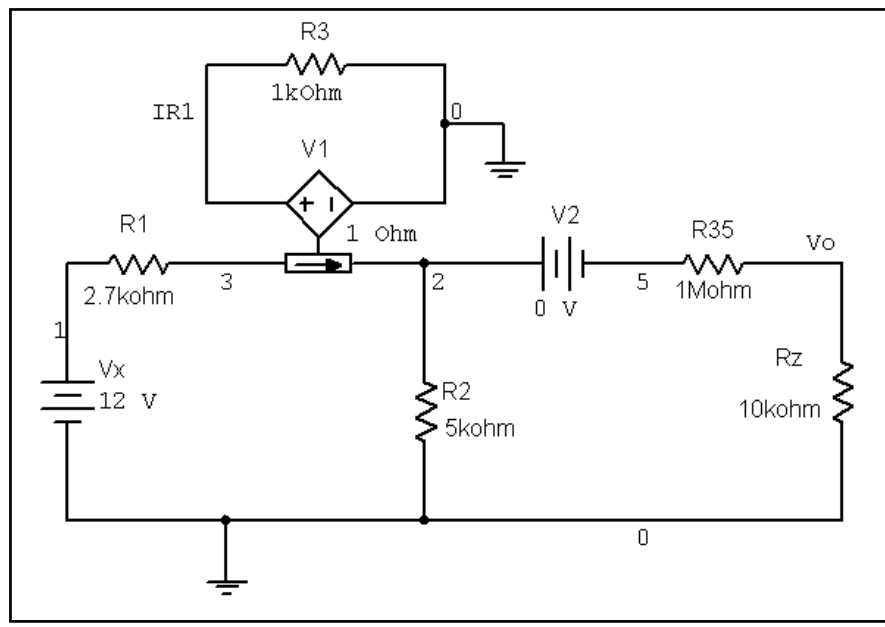
Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент в схему.

Измерим ток через резистор **R1**, для этого необходимо разорвать цепь и вставить индикатор тока между резистором **R1** и узлом **2**:

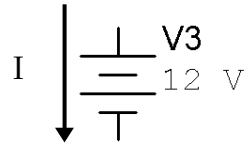


Зависимый источник напряжения называется «**V1**». Значение сопротивления для него равно **1 Ohm** (1 Ом). Это значит, что выходное напряжение источника равно значению тока, умноженному на 1 Ом (то есть коэффициент передачи для индикатора тока равен 1 В/А). Обратите внимание: резистор подключен на выход источника напряжения **V1**. Настройка и название резистора не имеют значения. Он был добавлен, чтобы упростить автоматический ввод номера для узла. В этой схеме узел называется **IR1**. Для того чтобы ввести название узла, дважды щелкнем по проводу между резистором и источником напряжения.

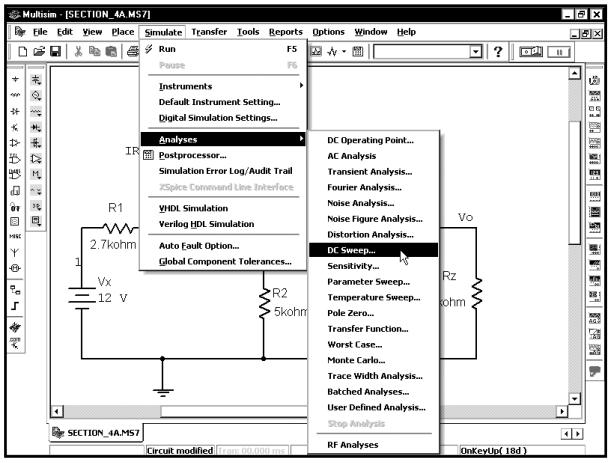
Далее добавим источник постоянного напряжения между компонентом R35 и узлом 2, чтобы измерять ток через R35 и Rz. Если установить напряжение этого источника равным 0 В, то он не повлияет на процессы в схеме. Программа Multisim позволяет отобразить значение тока через источник напряжения и добавить в график соответствующую кривую. Добавим в схему источник постоянного напряжения:

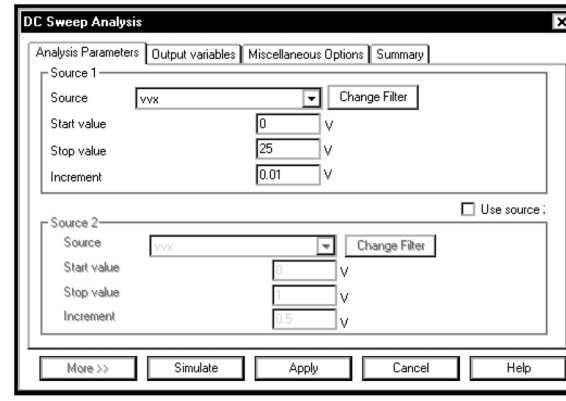


В нашей схеме этот источник напряжения называется **«V2»**, а его напряжение равно 0 В. Для источника напряжения ток определяется как положительный, когда он входит в «плюс». В диаграмме схемы положительный ток обозначен стрелкой:



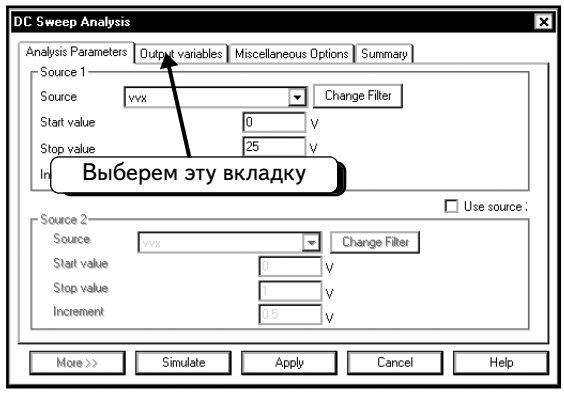
Завершив изменение схемы, выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep**:

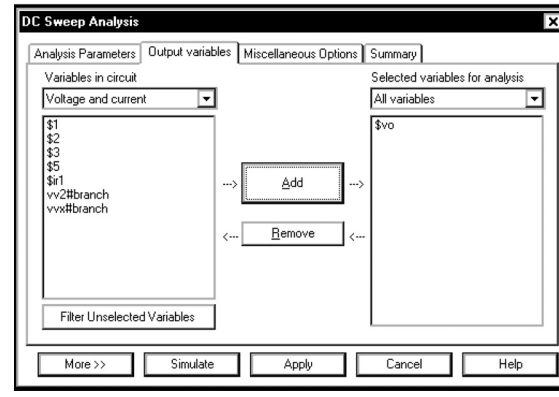




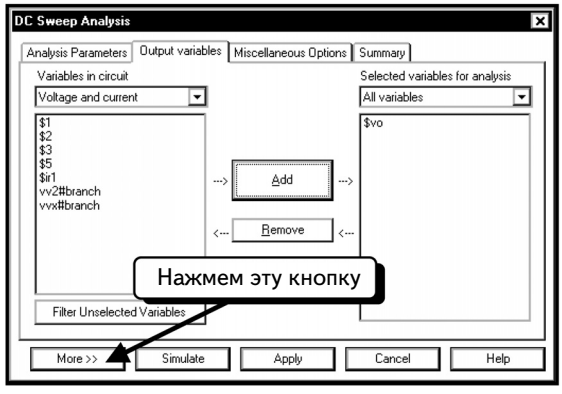
Если в диалоговом окне не отображаются настройки, которые показаны выше, изменим параметры.

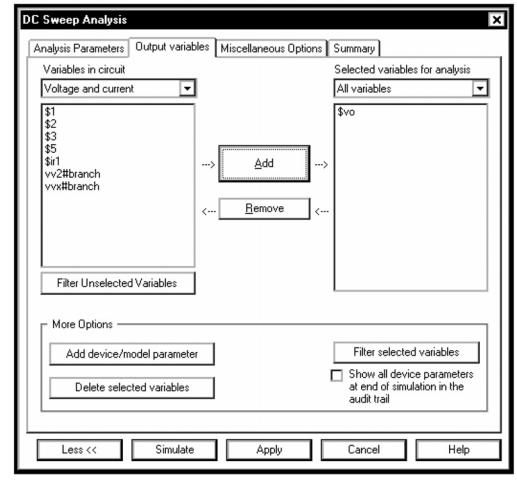
Далее рассмотрим второй способ, с помощью которого можно отобразить ток через резистор R1. Щелкнем по вкладке **Output variables**:



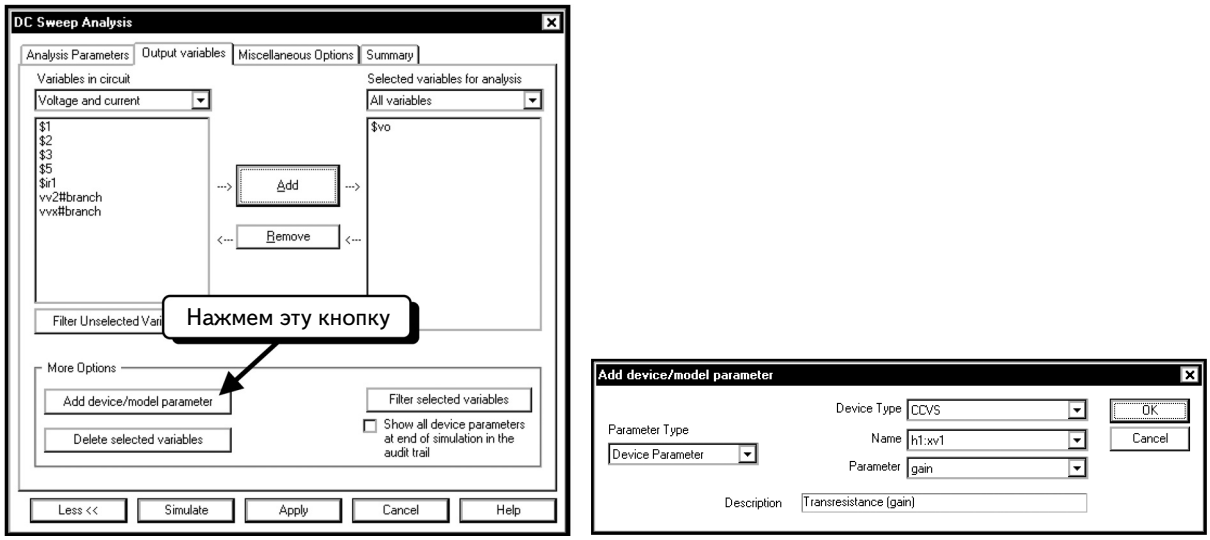


Нажмем кнопку **More >>**:

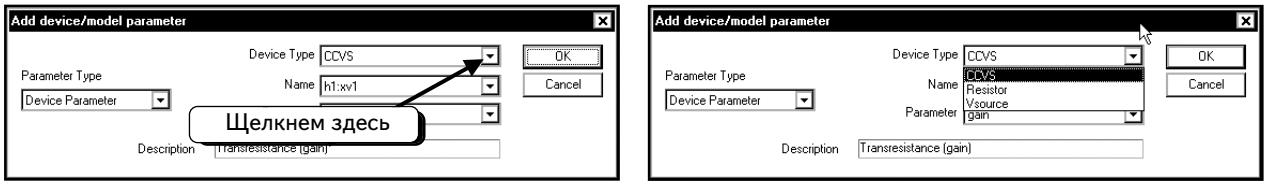




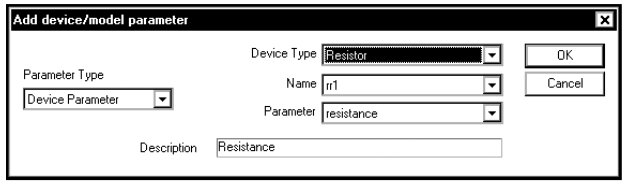
Нажмем кнопку **Add Device/Model Parameter** (**Добавить параметр компонента/модели**):



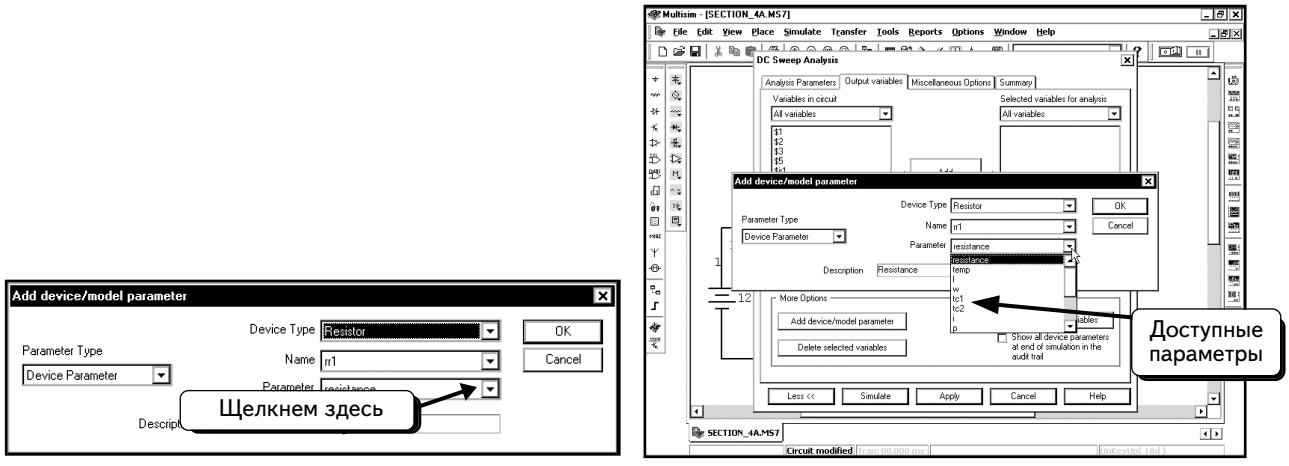
Мы хотим отобразить значение тока через резистор R1. Для этого необходимо выбрать тип компонента «резистор» и резистор R1. Щелкнем по символу в виде треугольника ▼ в поле **Device Type** (**Тип устройства**):



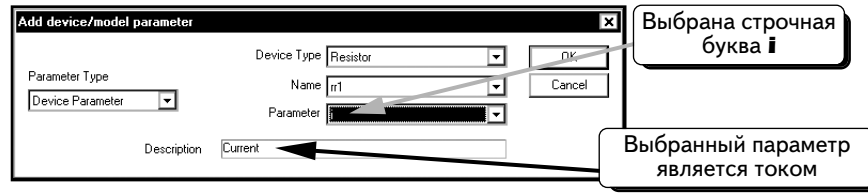
Выберем пункт **Resistor** (**Резистор**):



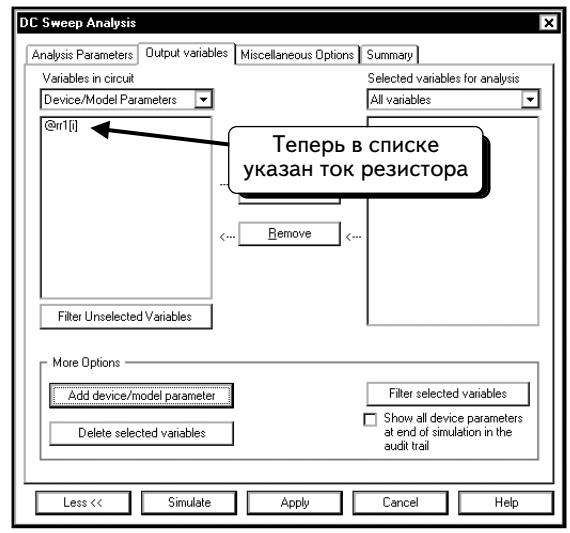
В поле **Name** диалогового окна резистор R1 (**rr1**) уже выбран. Если в вашем диалоговом окне резистор R1 не выделен, щелкнем по символу в виде треугольника ▼ в поле **Name** и выберем резистор **rr1**. Наконец, надо указать, какой параметр резистора мы хотим отобразить на графике. Щелкнем по символу в виде треугольника ▼ в поле **Parameter** (**Параметр**), чтобы открыть список доступных параметров:



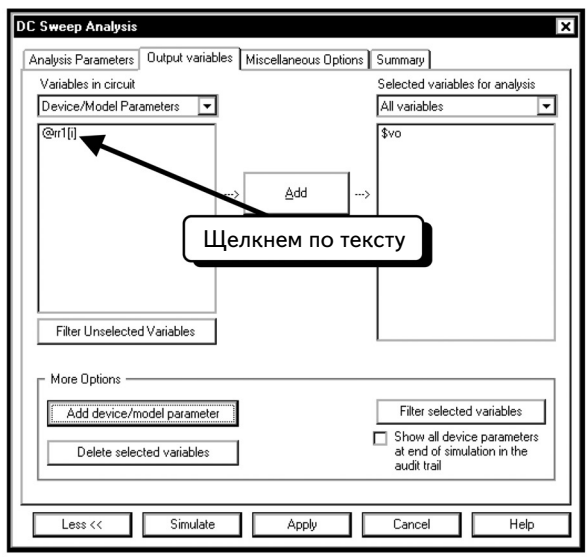
Выберем ток, щелкнув по символу в виде буквы **i**. (Будьте внимательны и не выберите символ в виде буквы **l** — длины резистора!) Если правильно выбрать параметр, в поле **Description** (**Описание**) отобразится текст **Current** (**Ток**):

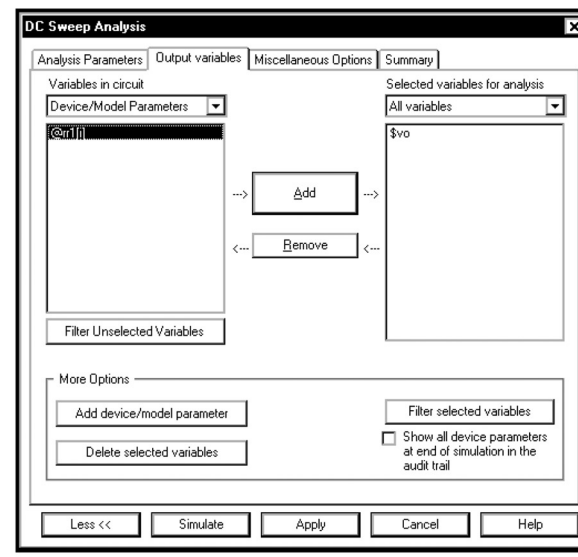


Нажмем кнопку **OK**. Ток резистора отобразится в виде переменной, которую можно добавить в график :

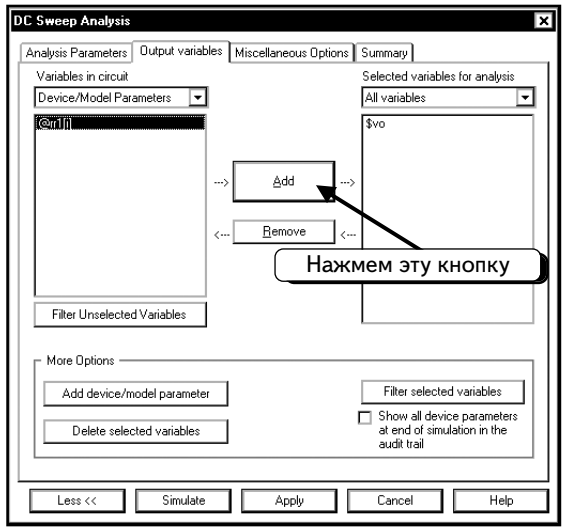


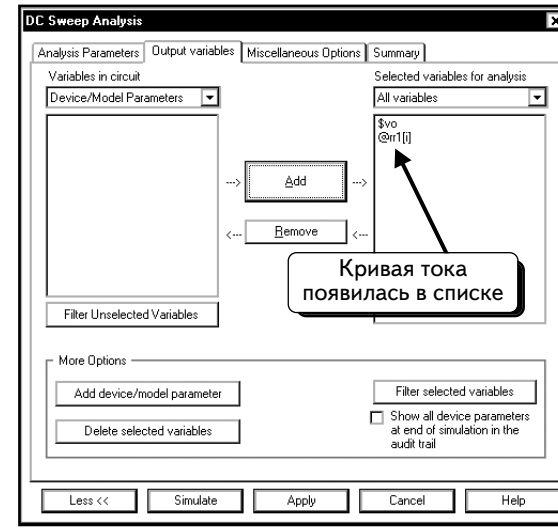
Теперь включим эту кривую в состав кривых, отображаемых во время моделирования. Щелкнем по переменной **@rr1 [i]**:





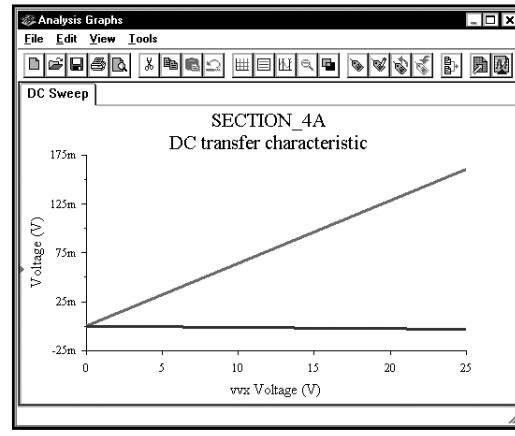
Нажмем кнопку **Add**:



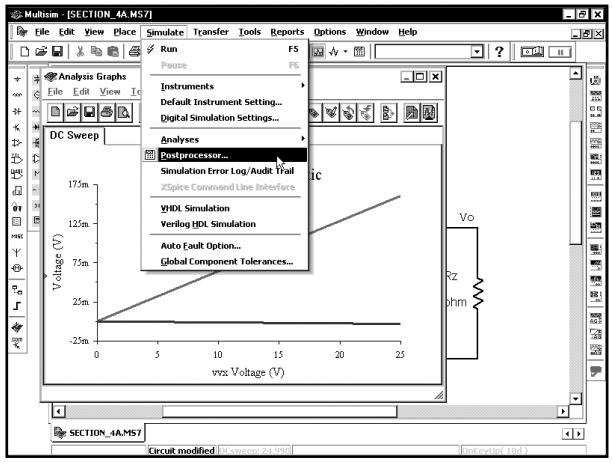


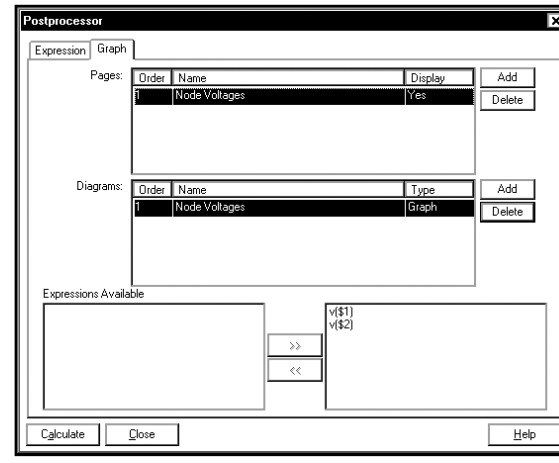
Кривая будет отображаться во время моделирования, и можно будет работать с ней в программе Postprocessor. Помните, что в начале этого примера мы добавили кривую **$vo**.

Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы провести моделирование. В окне **Analysis Graphs** отобразятся напряжение узла **Vo** и ток резистора **R1**:

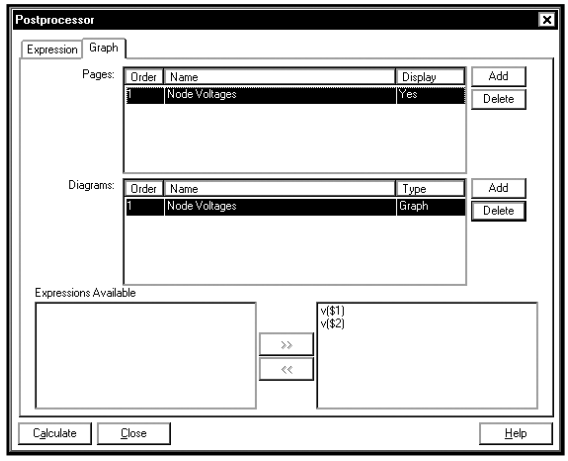


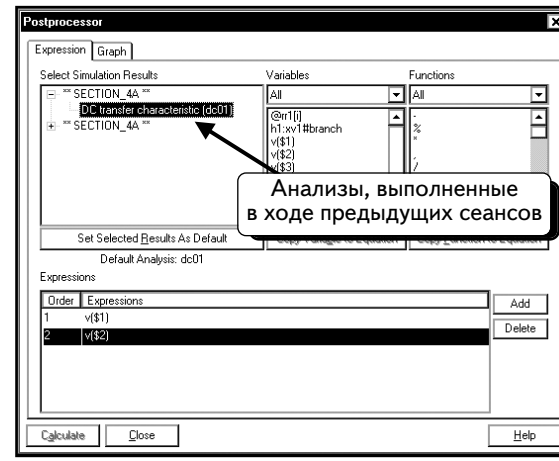
Теперь мы отобразим кривые с помощью программы Postprocessor. Чтобы открыть ее, выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Postprocessor**:



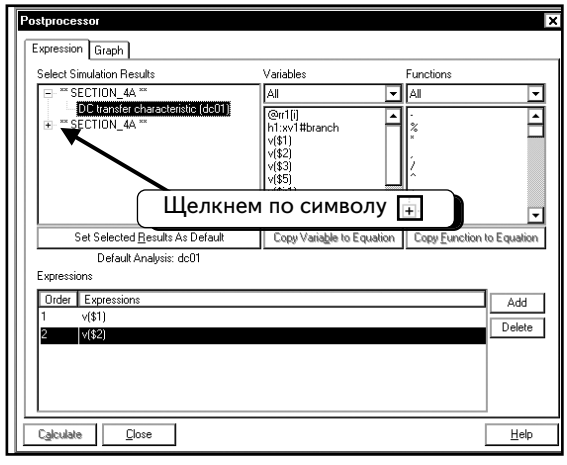


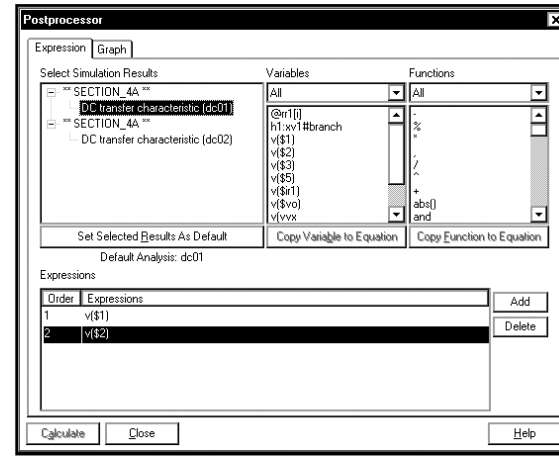
Щелкнем по вкладке **Expression**:



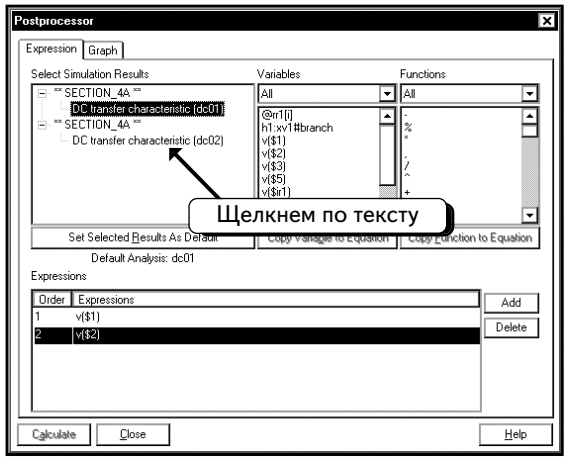


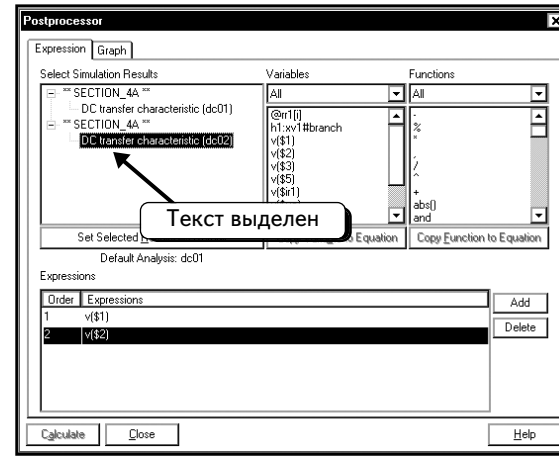
Сейчас у нас выбрана группа данных из предыдущего анализа **DC Sweep**. Надо выбрать группу данных из последнего анализа. Щелкнем по символу ⊞, как показано ниже. Список будет раскрыт, и в нем появятся доступные группы данных:





Щелкнем по опции ***DC transfer characteristic (dc02)***, чтобы выбрать группу данных:

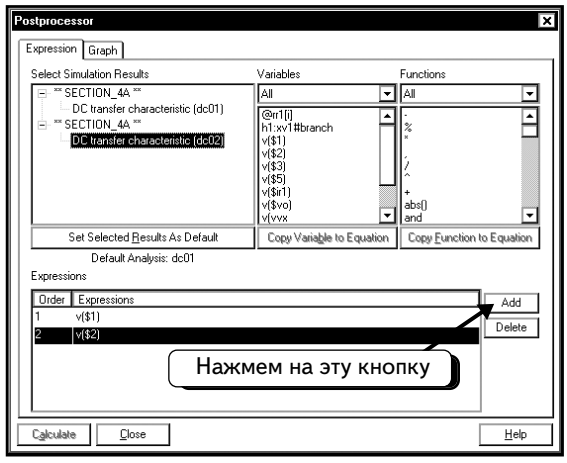


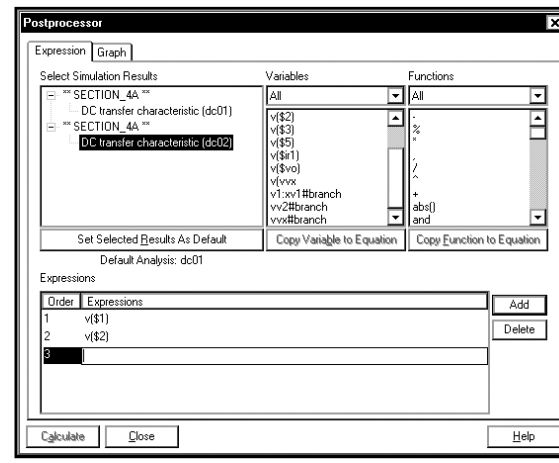


Теперь создим выражения для графика. Отобразим следующие кривые:

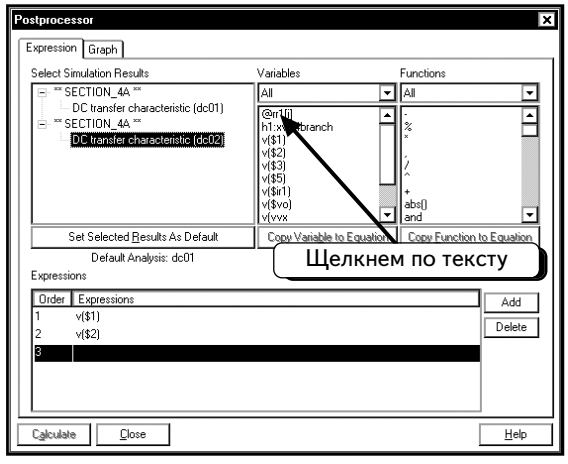
- **@rr1[i]** — ток через резистор R1;
- **v($ir1)** — напряжение на узле IR1. Это выходное напряжение датчика тока, который мы создали;
- **vv2#branch** — ток через источник v2, который равен току через резисторы R35 и Rz.

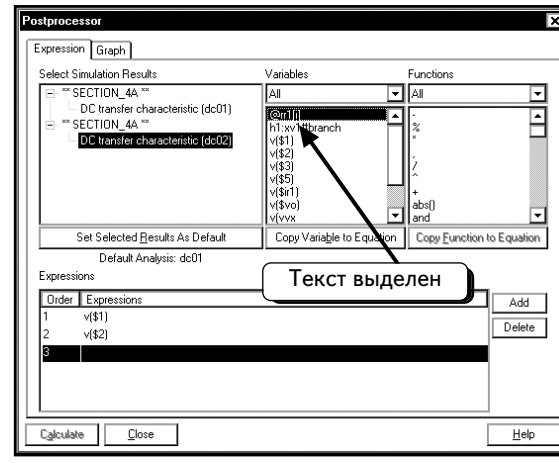
Чтобы добавить выражение, нажмем кнопку ***Add***:



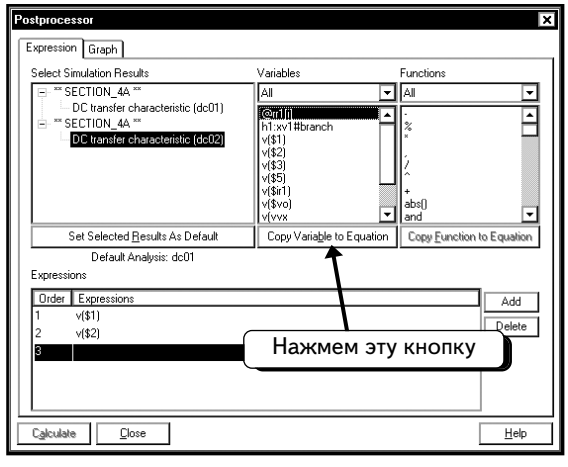


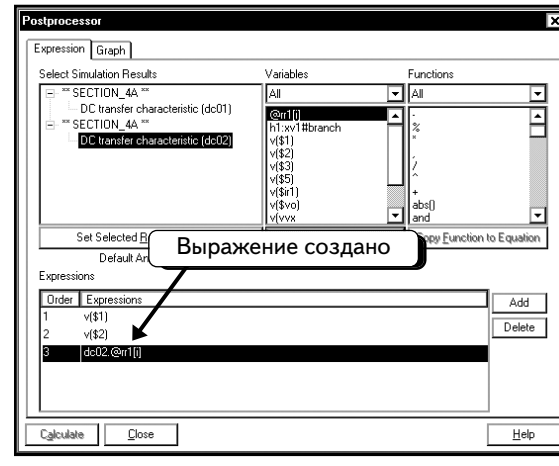
Покажем в качестве примера, как следует добавить выражение @rr1[i]. Щелкнем по переменной @rr1[i], чтобы выбрать ее:



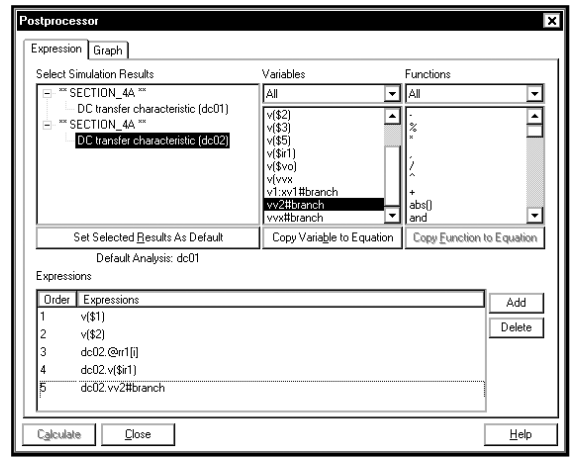


Нажмем кнопку **Copy Variable to Equation** (**Копировать переменную в равенство**), чтобы добавить переменную в выражение:



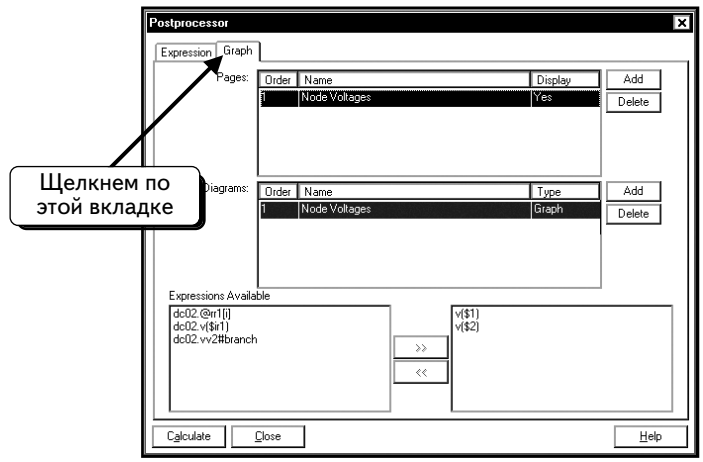


Выражение создано. Чтобы создать новое выражение, нажмем кнопку **Add**. Повторим процедуру и добавим два выражения для переменных **v($ir1)** и **vv2#branch**:

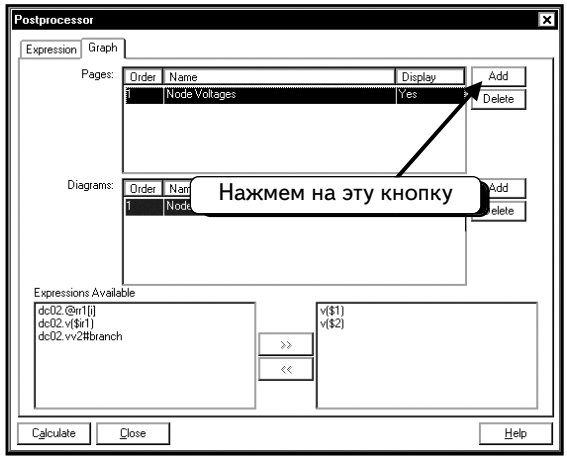


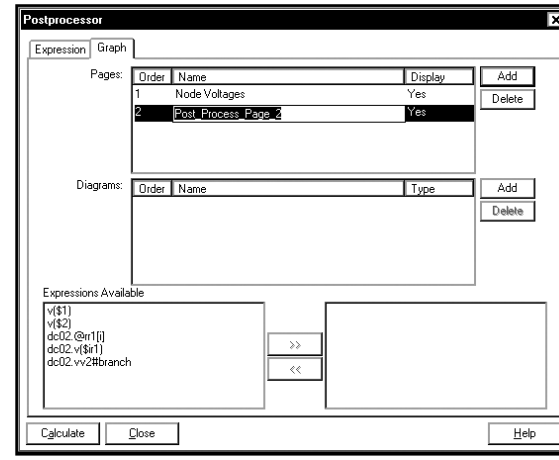
Обратите внимание: все добавленные нами переменные имеют префикс **dc02**, например **dc02.v($ir1)**. Это объясняется тем, что моделирование выполнялось несколько раз, и программа Postprocessor позволяет нам добавлять в график любые кривые. Название **dc02** показывает, с каким сеансом моделирования связана эта группа данных.

Теперь можно перейти на вкладку Graph и создать графики. Щелкнем по вкладке:

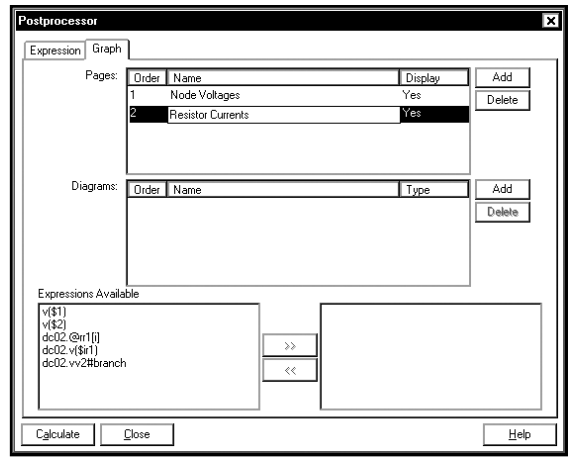


Сейчас в окне Postprocessor имеется один график — **Node Voltages**, созданный в предыдущем примере. Чтобы создать новую страницу в окне Grapher и добавить в нее график, нажмем кнопку **Add**:

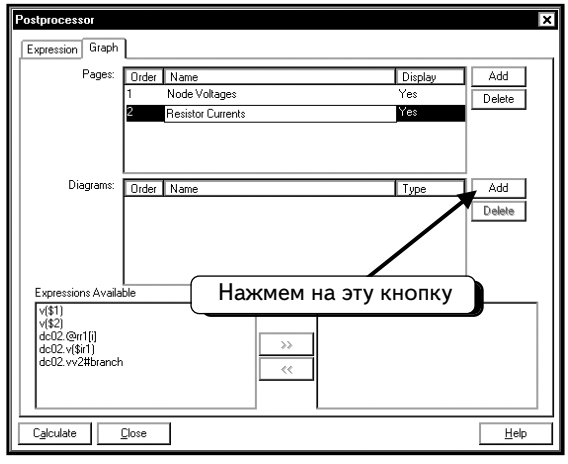


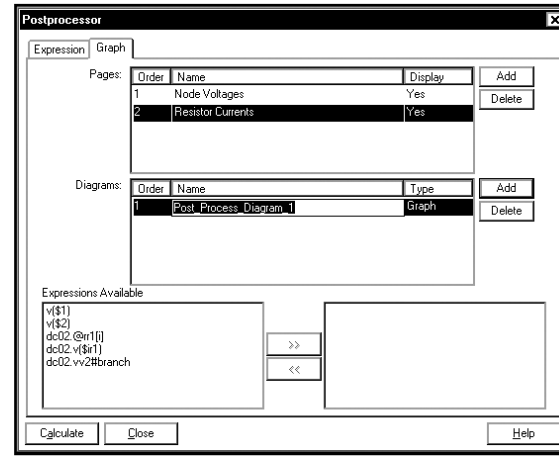


Введем название новой страницы, например **`Resistor Graphs`**:

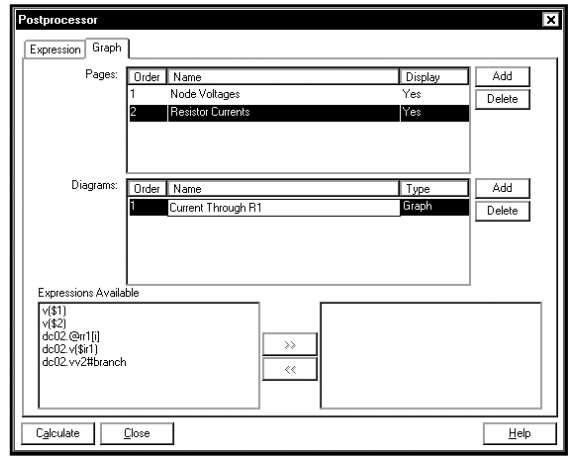


Нужно добавить на эту страницу два графика. Нажмем нижнюю кнопку ***Add***, чтобы добавить график:

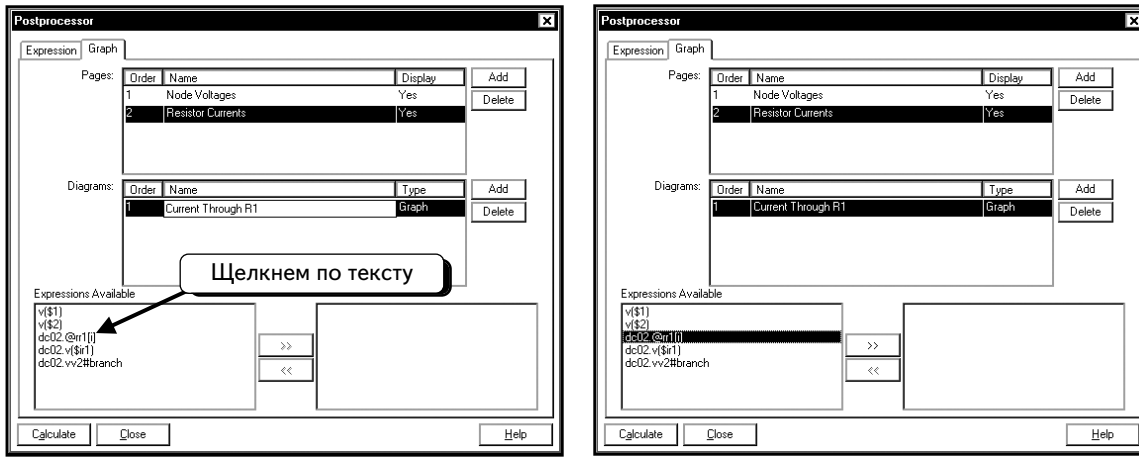




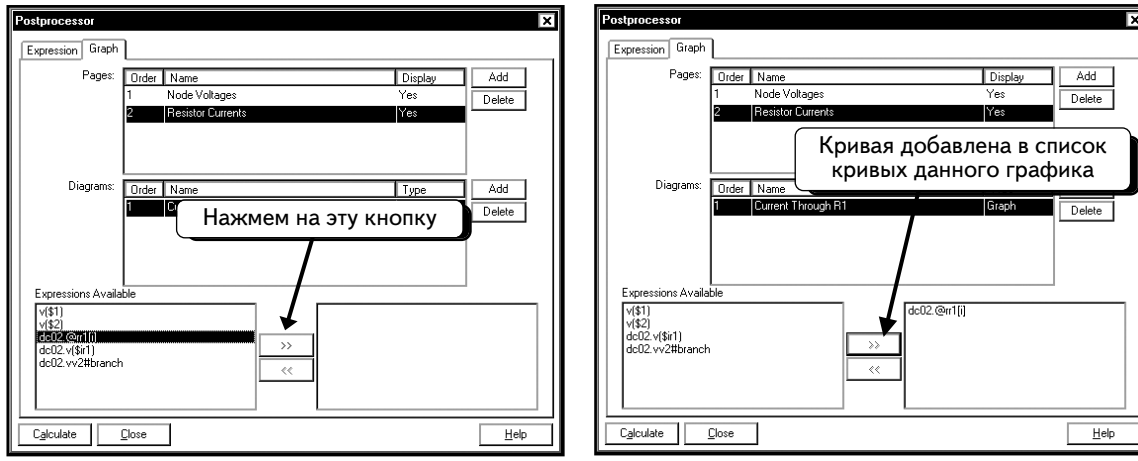
Введем название графика, например **`Current Through R1`**:



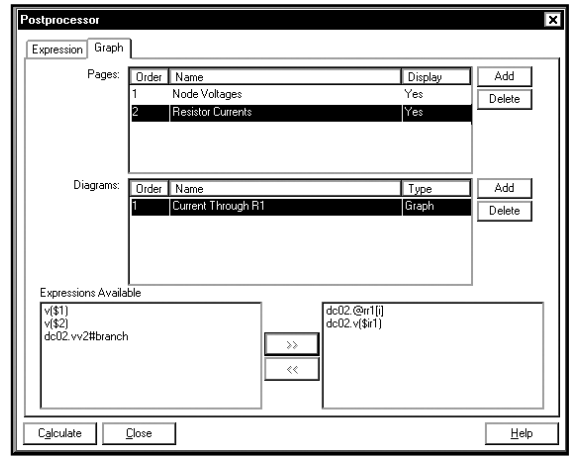
Добавим в этот график кривые. Щелкнем по переменной ***dc02.@rr1[i]***, чтобы выбрать кривую:



Нажмем кнопку [>>], чтобы добавить в график кривую:

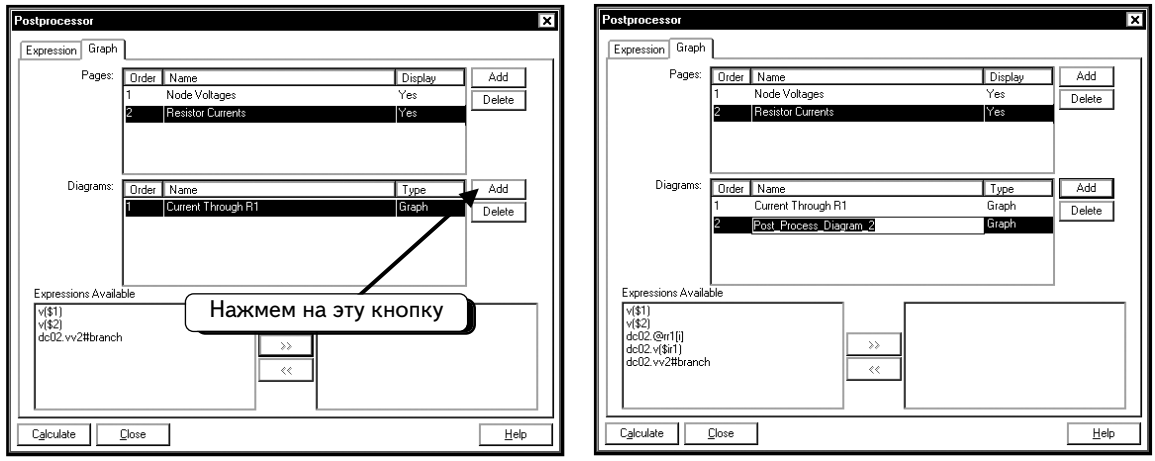


Повторим процедуру, чтобы добавить в график кривую **dc02.v($ir1)**:

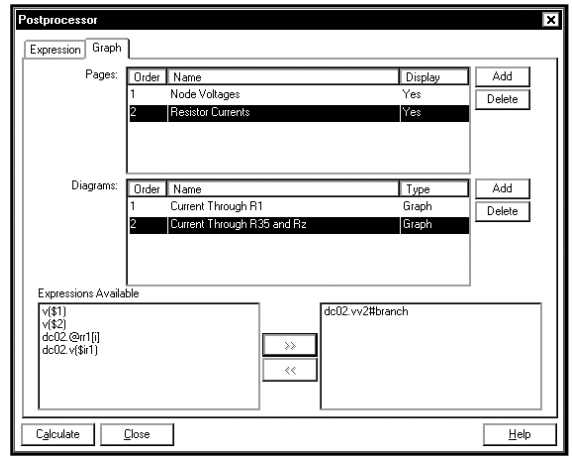


Обратите внимание на то, что обе кривые показывают одну и ту же переменную, поэтому они должны быть идентичны.

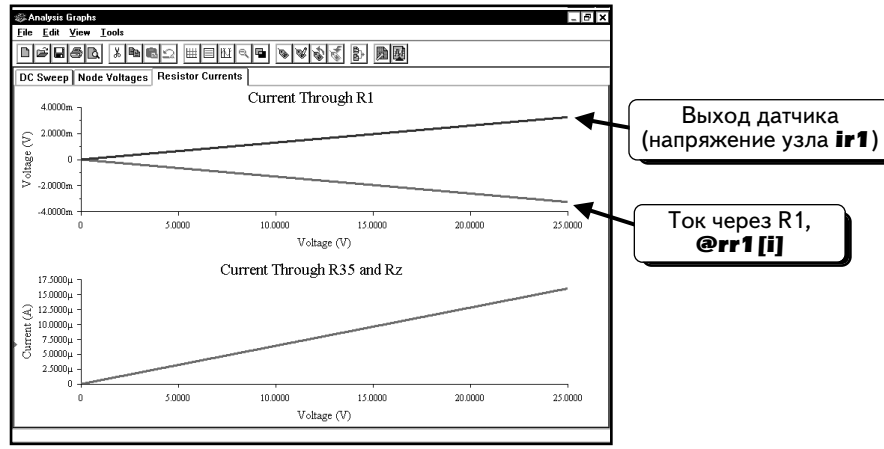
Теперь добавим на страницу второй график, показывающий ток через резисторы R35 и Rz, для этого нажмем нижнюю кнопку **Add**:



Введем название графика (`Current Through R35 and Rz`) и добавим в него кривую **dc02.vv2#branch:**

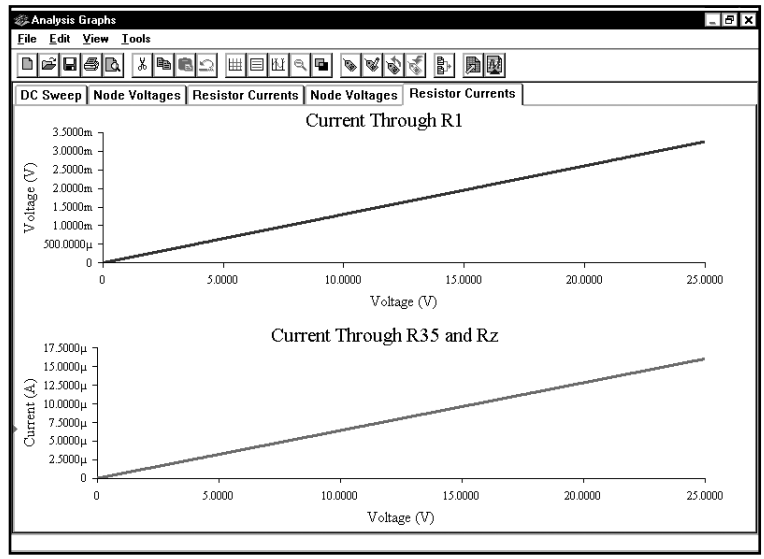


Нажмем кнопку **Calculate**, чтобы вывести графики:



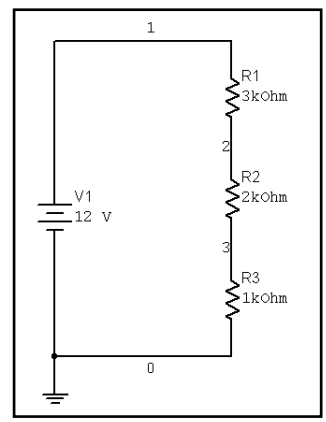
Видно, что две кривые тока на резисторе R1 отличаются только тем, что одна из них является положительной, а другая — отрицательной. Отметим, что при работе с такими параметрами, как **@rr1[i],** мы не знаем, какое направление тока считается положительным. Если повернуть резистор R1 на схеме на 180°, направление тока изменится. Кроме того, известно, что для переменной **@rr1[i]** на оси у отображается ток, а не напряжение. При желании можно изменить ярлык оси (см. раздел 2.6.3). При работе с датчиками очевидно, какое направление считается положительным (в данном случае — слева направо), так как его показывает стрелка на условном изображении компонента.

Зная, что ток через резистор R1 протекает слева направо, можно добавить переменную **-@rr1[i]**, чтобы исправить ошибку:

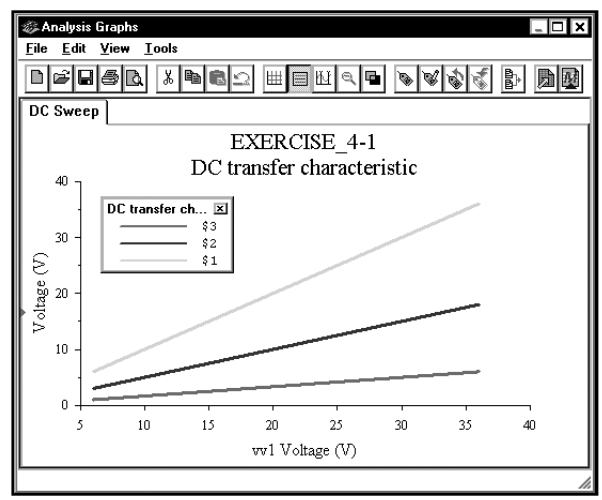


Как видим, оба метода отображения тока через резистор R1 привели к одинаковым результатам.

УПРАЖНЕНИЕ 4-1: Определите напряжения на узлах **1**, **2** и **3** схемы при условии, что постоянное напряжение источника **V1** изменяется от 6 до 36 В:

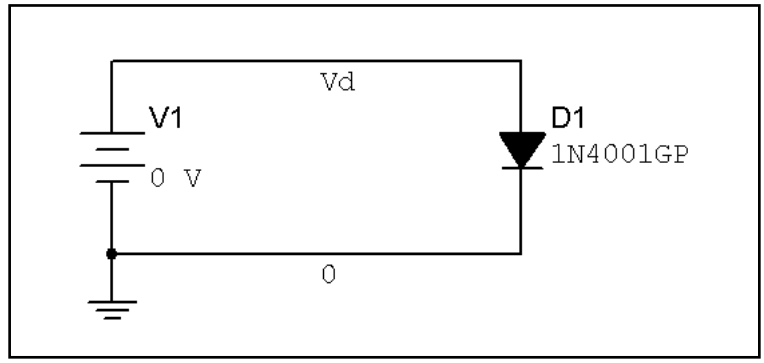


РЕШЕНИЕ: Результаты выполнения функции **DC Sweep** показаны на графике:

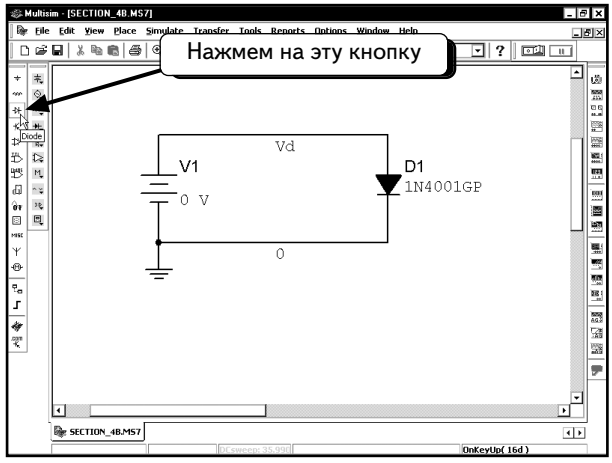


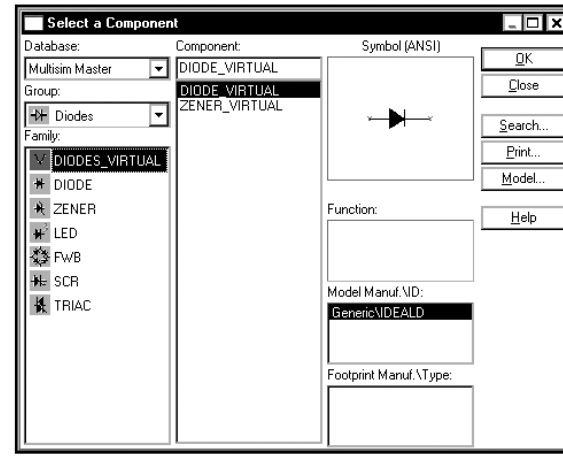
4.2. Вольтамперная характеристика диода

С помощью анализа Spice определим вольтамперную характеристику (ВАХ) (**I-V Characteristic**) полупроводникового диода. Создадим следующую схему:

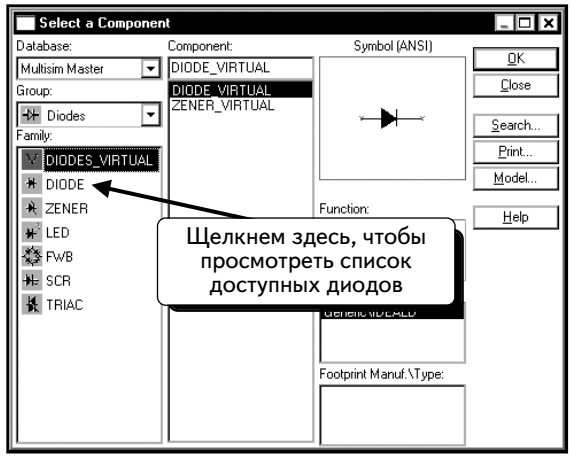


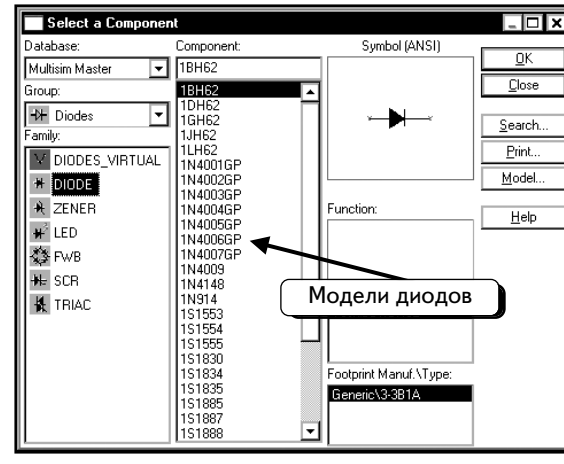
Заметьте что мы назвали верхний узел **Vd** и не использовали нумерацию. Чтобы обозначить провод, дважды щелкнем по нему[1]. Чтобы добавить диод 1N4001GP, нажмем кнопку **DIODE** (**Диод**) :





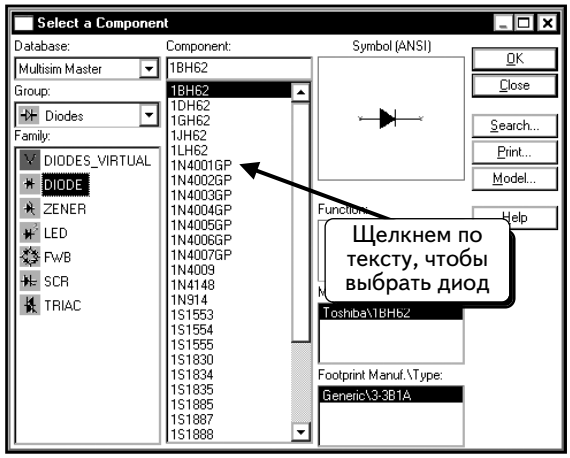
Выберем семейство **DIODE**, чтобы просмотреть список доступных моделей диодов:

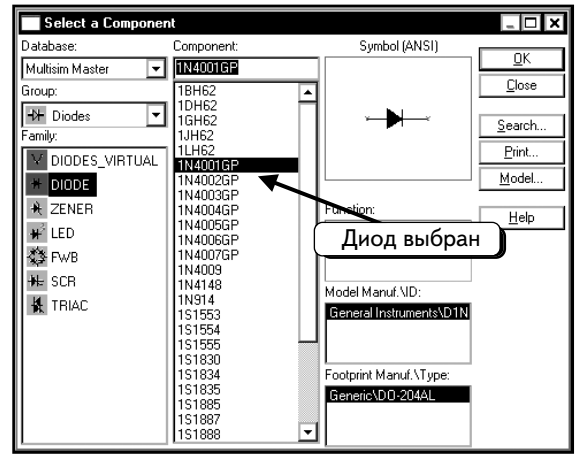




[1] Как пометить провод или ввести название узла, можно посмотреть в разделе 1.7.

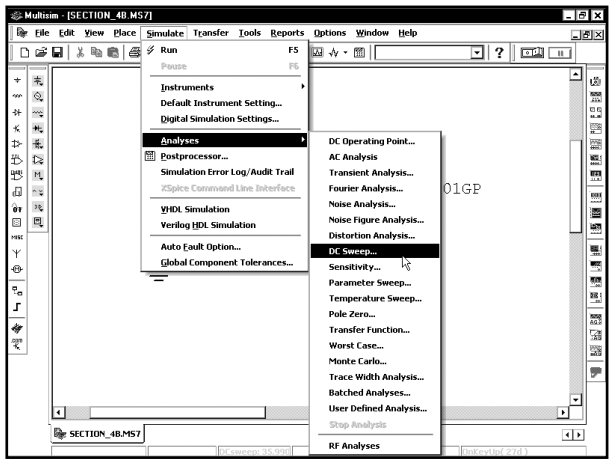
Выберем модель **1N40011GP**:

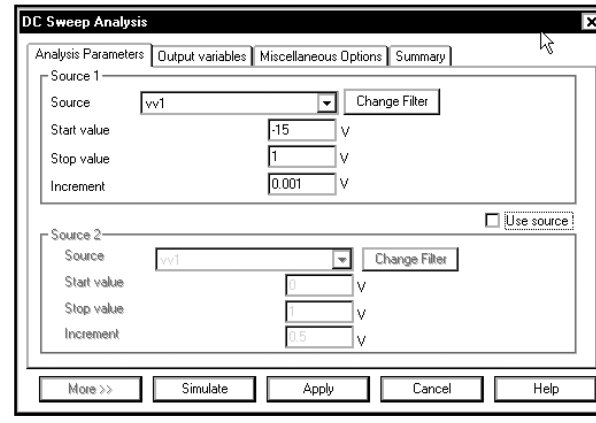




Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить диод.

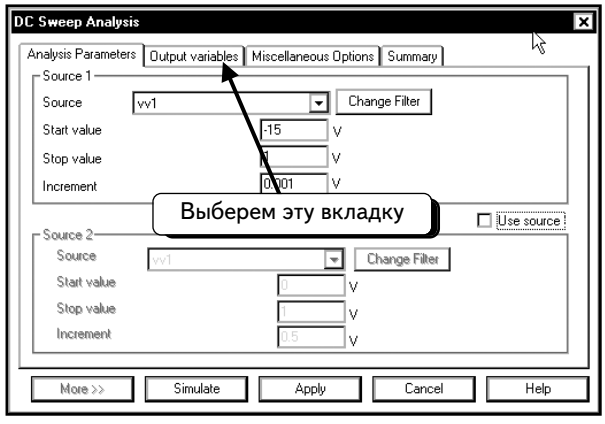
После создания схемы следует настроить функцию **DC Sweep**. Выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep** и введем данные в диалоговом окне, как показано:

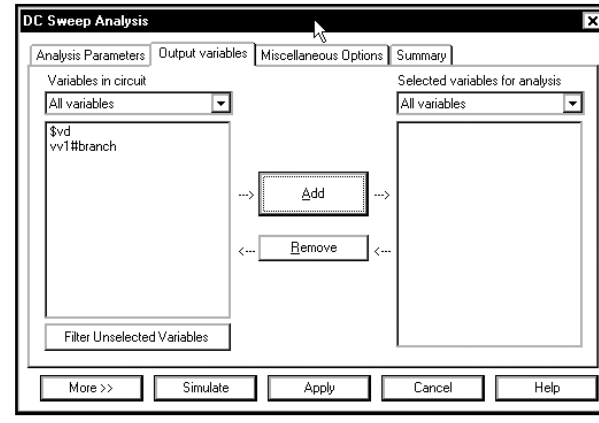




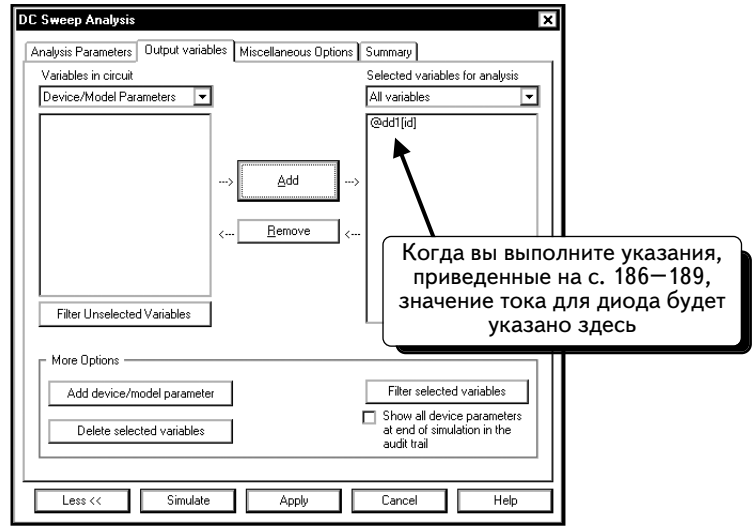
Настройки в диалоговом окне ***DC Sweep Analysis*** показывают, что напряжение источника **V1** меняется от **–15** до **1** В с шагом в **0.001** В.

Чтобы просмотреть значение выходного тока, надо добавить в список выходных переменных ток диода. Щелкнем по вкладке ***Output variables***:



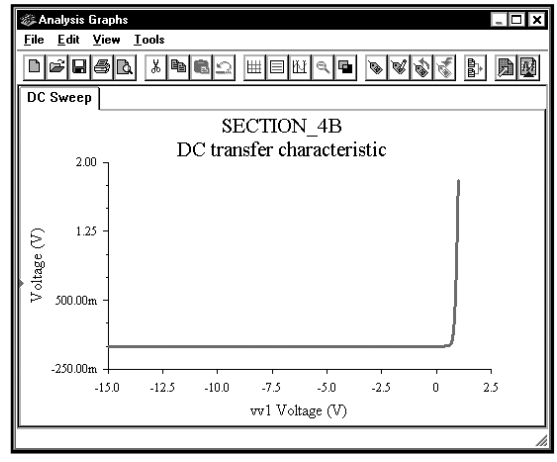


Нажмем кнопку **More >>** и выберем в качестве выходной переменной ток диода (как сделать ток компонента выходной переменной, можно посмотреть на с. 186—189):

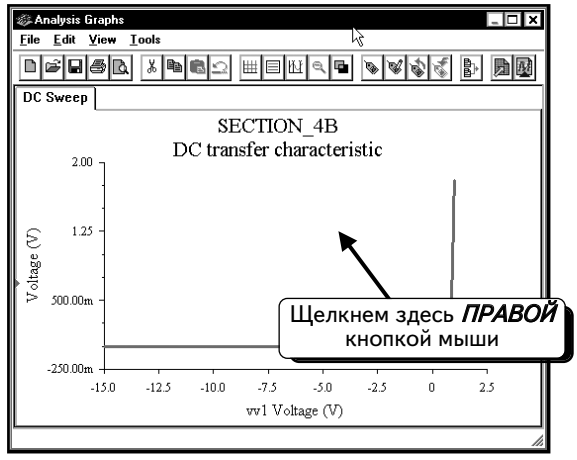


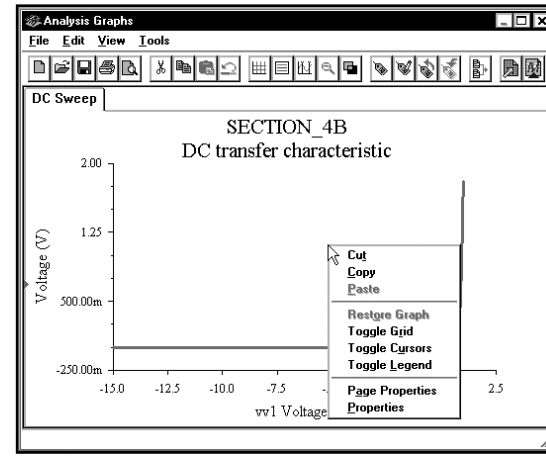
Так как ток диода был добавлен в список выходных переменных, он будет автоматически отображаться на графике во время моделирования.

Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Откроется окно **Analysis Graphs**, в котором отобразится вольтамперная характеристика (ВАХ):

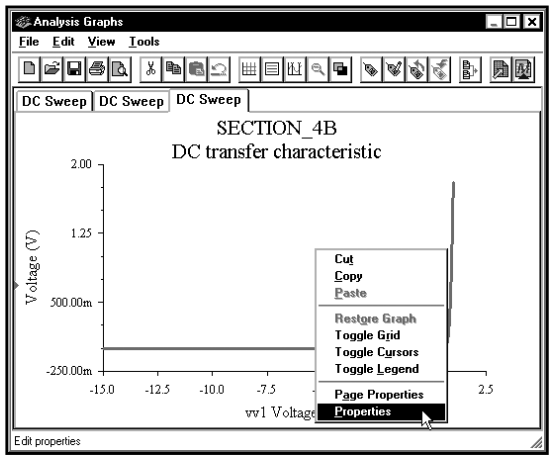


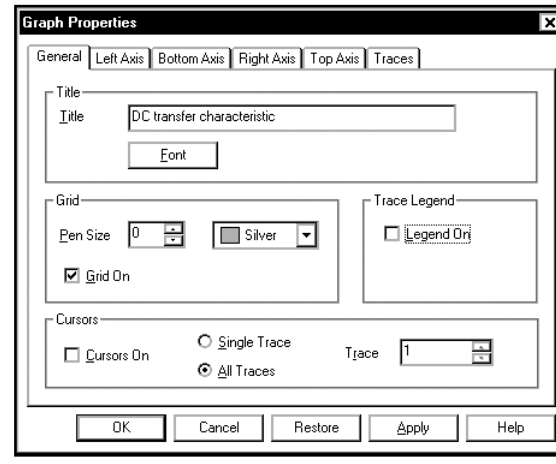
Чтобы изменить настройки графика, щелкнем по нему ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши:



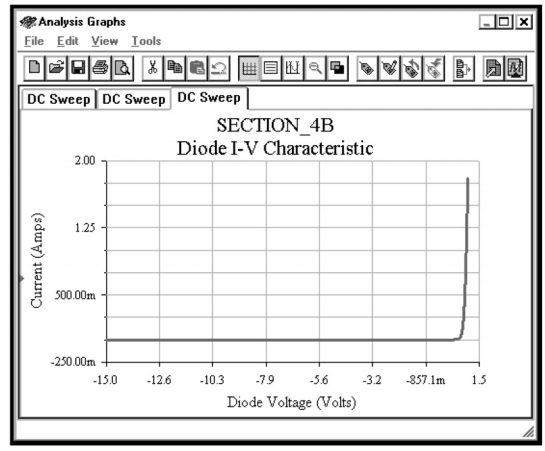


Выберем пункт **Properties**:



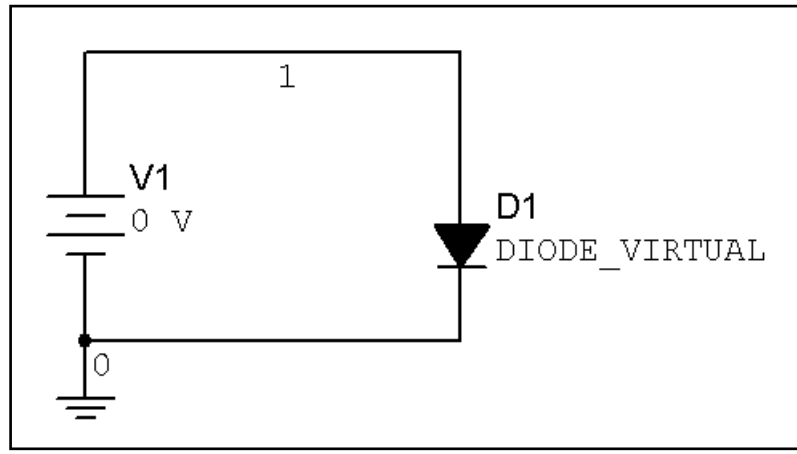


Изменим параметры графика таким образом, чтобы он принял следующий вид:

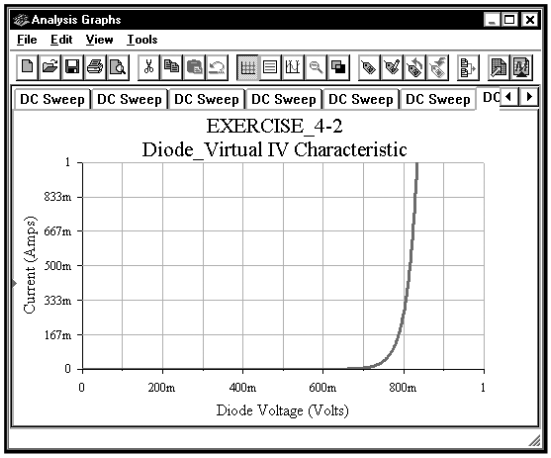


Отметим, что для выбранного типа диода ток слишком велик. Диод 1N4001 может работать только при токах не более 1 А. Ток в схеме равен 2 А, так как мы задали для диода высокое значение прямого падения напряжения (1 В), а для стандартного диода 1N4001 оно должно составлять около 0,7 В.

УПРАЖНЕНИЕ 4-2: Получите вольтамперную характеристику виртуального диода

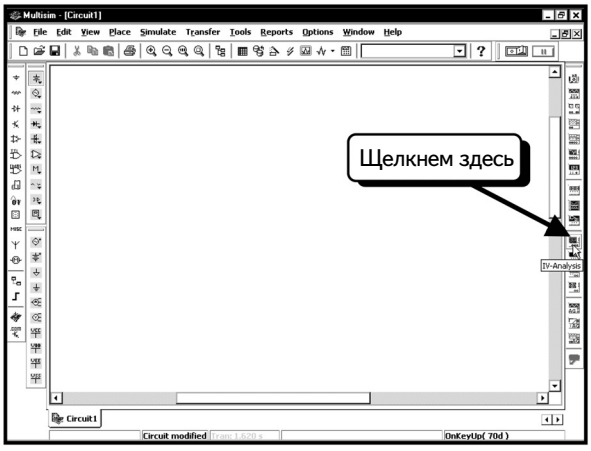


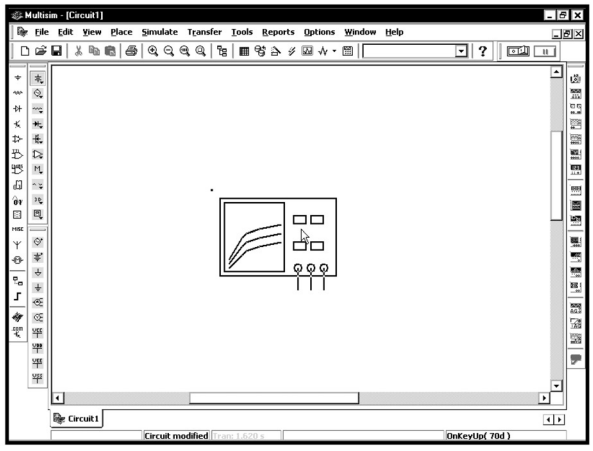
РЕШЕНИЕ: С помощью анализа **DC Sweep** проведите вариацию напряжения от 0 до 1 В. После отображения кривой настройте ось у на отображение значений между 0 и 1 А:



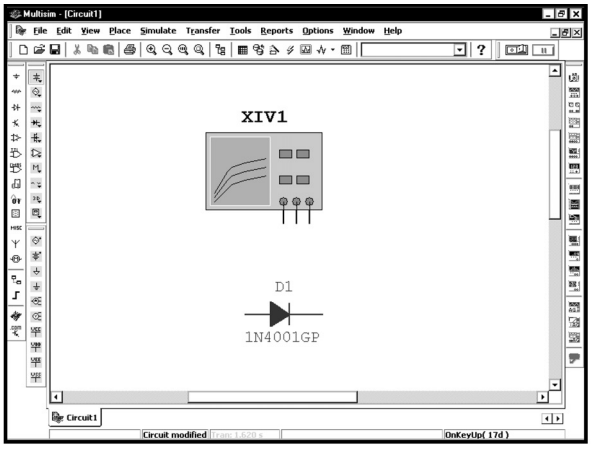
4.2.1. Получение вольтамперной характеристики диода с помощью IV-плоттера

Далее мы создадим график ВАХ диода 1N4001GP с помощью инструмента IV-плоттер программы Multisim 7. Это новый инструмент в версии Multisim 7. Чтобы добавить его, нажмем кнопку ***IV Analysis*** **(Анализ ВАХ)** . Инструмент будет «привязан» к курсору мыши:

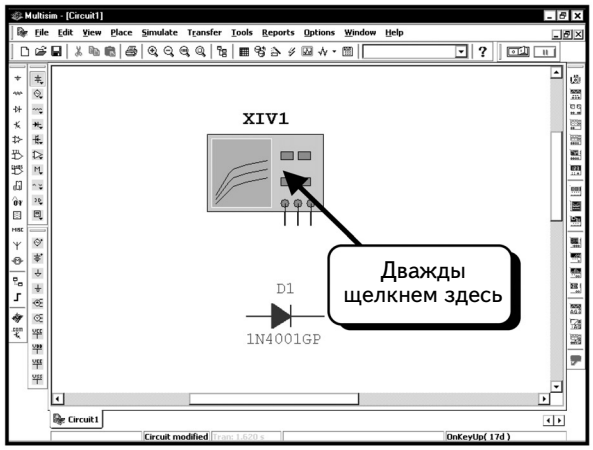


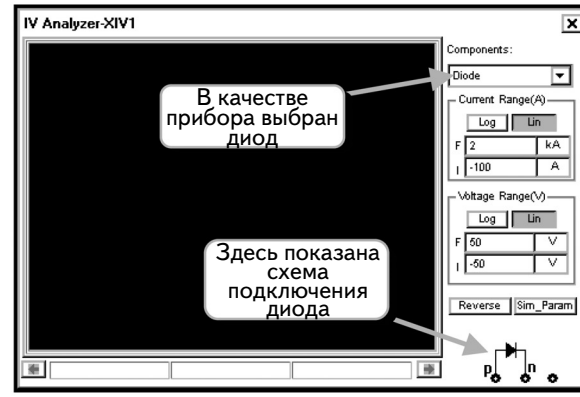


Вставим в схему, кроме IV-плоттера, диод 1N4001GP:

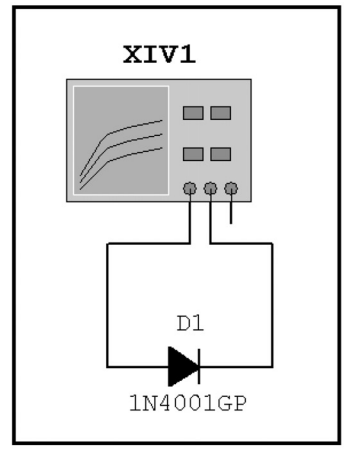


Чтобы понять, как следует соединить плоттер и диод, надо открыть инструмент. С его помощью можно создавать ВАХ для компонентов с двумя и тремя полюсами. Дважды щелкнем по инструменту, чтобы открыть его:

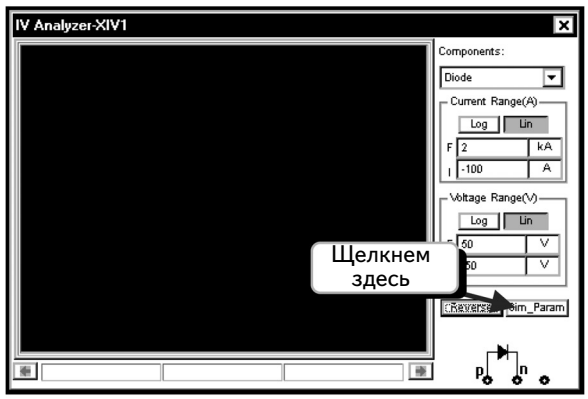


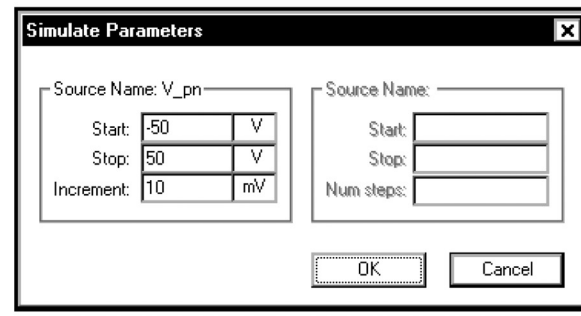


В правой нижней части экрана показано, как нужно подключить диод к плоттеру. Убедимся в том, что в поле **Components (Компоненты)** выбрана опция **Diode,** или выберем ее самостоятельно. Закроем диалоговое окно и подключим диод к плоттеру:



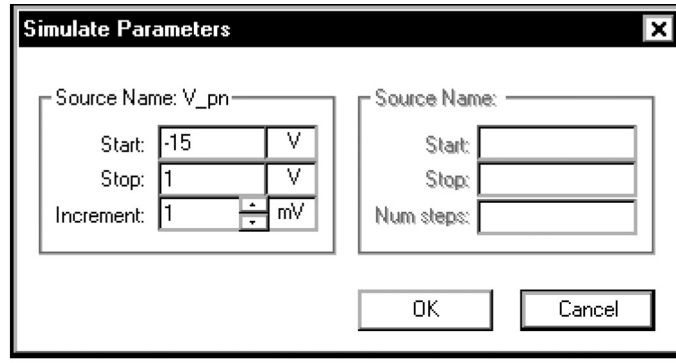
Теперь можно настроить параметры инструмента. Дважды щелкнем по плоттеру, чтобы открыть его, и потом нажмем кнопку **Sim_Param (Параметры моделирования)**:



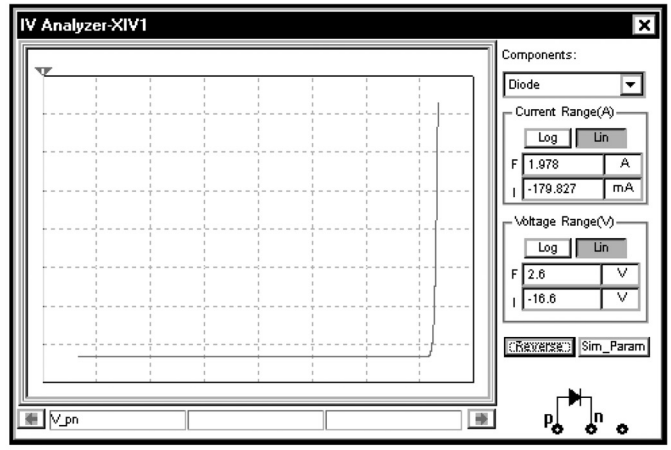


В этом диалоговом окне указаны параметры для ВАХ. При получении данных для графика надо изменить напряжение на диоде так же, как мы это делали ранее с помощью функции **DC Sweep**.

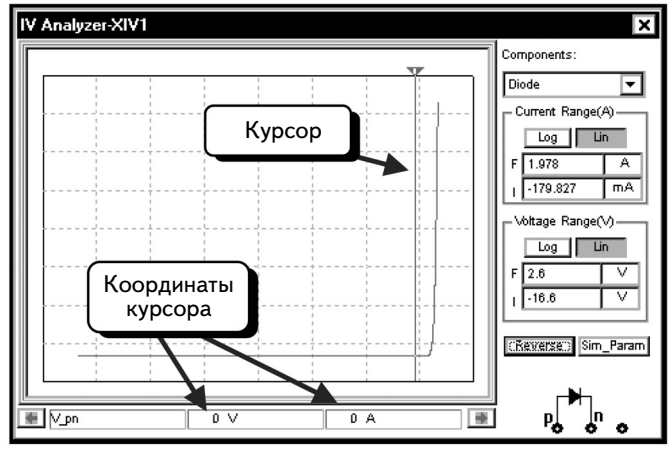
Настроим параметры в соответствии с параметрами функции **DC Sweep** на с. 198:



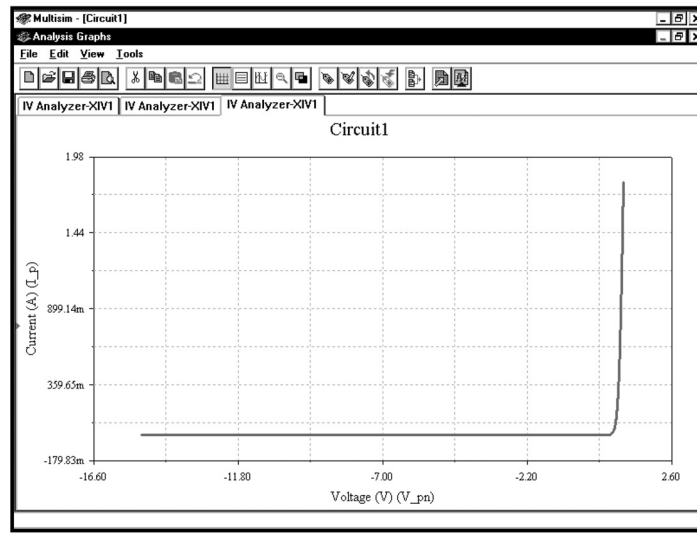
Мы будем изменять напряжение диода от –15 до 1 В с шагом в 1 мВ. Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения, а затем клавишу **F5**, чтобы начать моделирование и создать ВАХ:



После получения кривой повторно нажмем клавишу **F5**, чтобы остановить моделирование. Теперь можно использовать курсор, чтобы просмотреть точки на кривой:

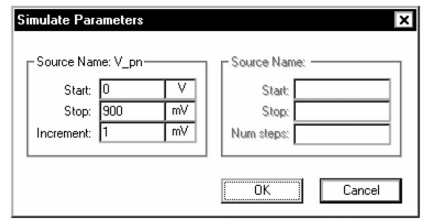


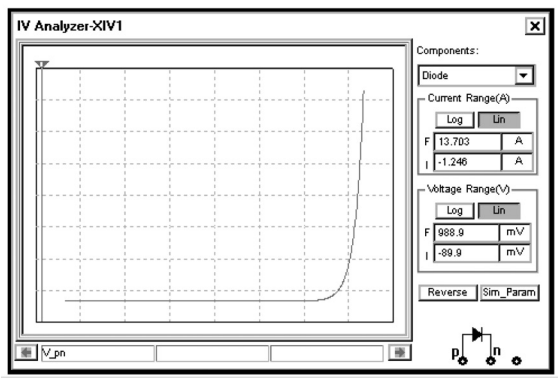
Можно также с помощью клавиш **CTRL+G** открыть окно Grapher и просмотреть ВАХ в нем:

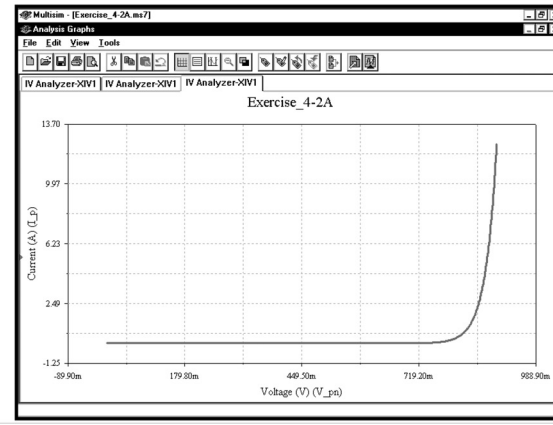


УПРАЖНЕНИЕ 4-2A: Отобразите вольтамперную характеристику виртуального диода с помощью инструмента **IV-плоттер.**

РЕШЕНИЕ:





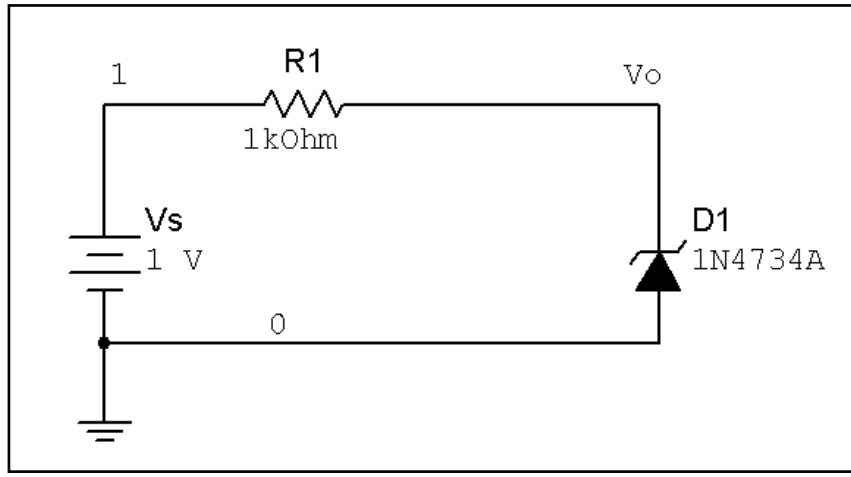


4.3. Передаточные кривые на постоянном токе

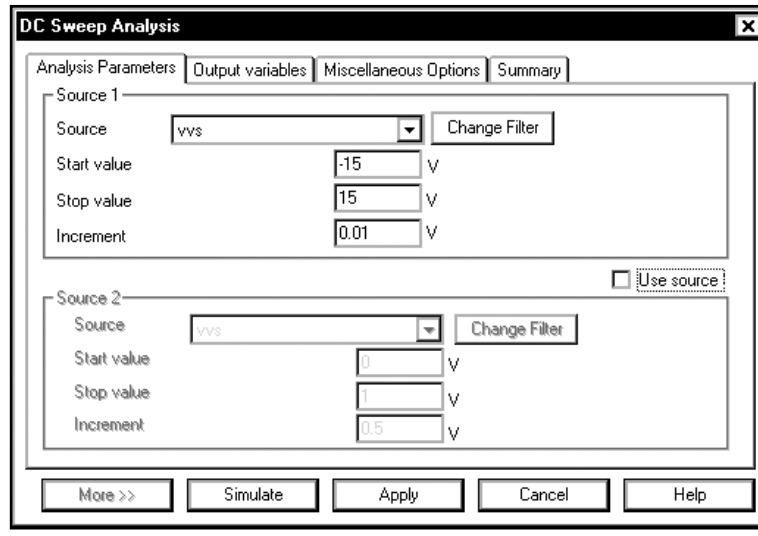
Одна из полезных функций анализа **DC Sweep** — это возможность графического отображения передаточных кривых (transfer curves). Передаточная кривая показывает зависимость выходного сигнала от входного. При этом исследуется схема, в которой все конденсаторы представляют собой разрывы схемы, а все катушки индуктивности замкнуты накоротко. Это позволяет использовать анализ **DC Sweep** для построения передаточных кривых на постоянном токе.

4.3.1. Ограничитель на стабилитроне

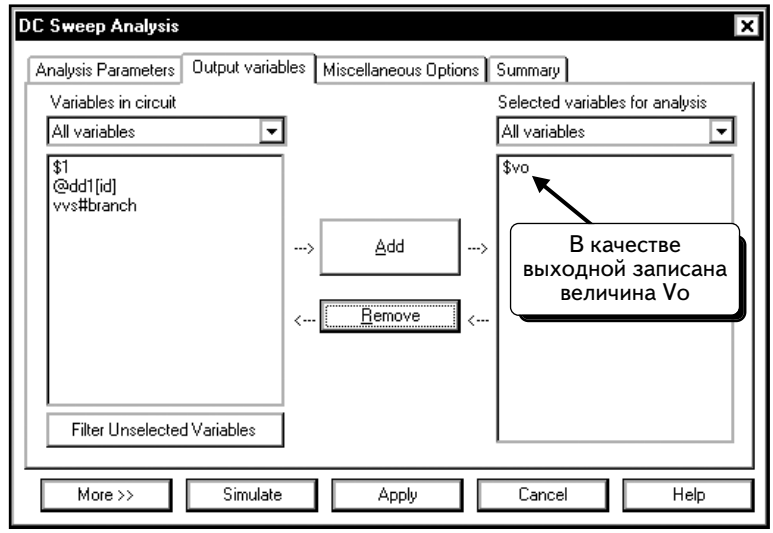
Схема, приведенная ниже, позволяет измерить положительное напряжение при зенеровском пробое (Zener breakdown), а также отрицательное напряжение диода, которое соответствует прямому падению напряжения обычного диода и составляет примерно 0,6—0,8 В.



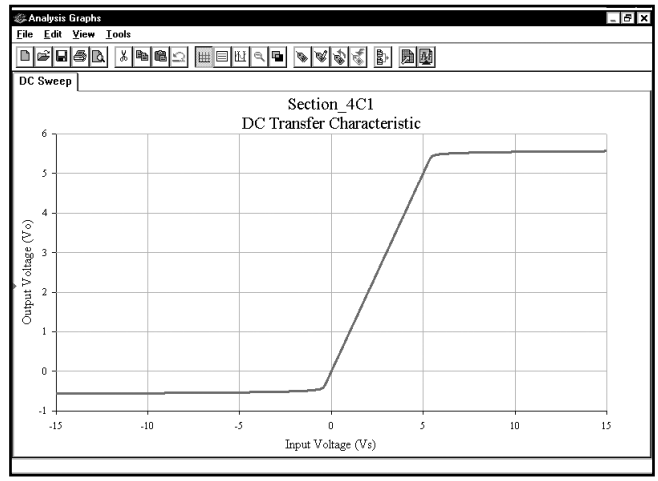
Чтобы получить передаточную кривую при изменении напряжения **Vs** от –15 до +15 В, выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep** и заполним, как показано, диалоговое окно:



Далее щелкнем по вкладке **Output variables** и в качестве выходного параметра выберем напряжение **Vo**:

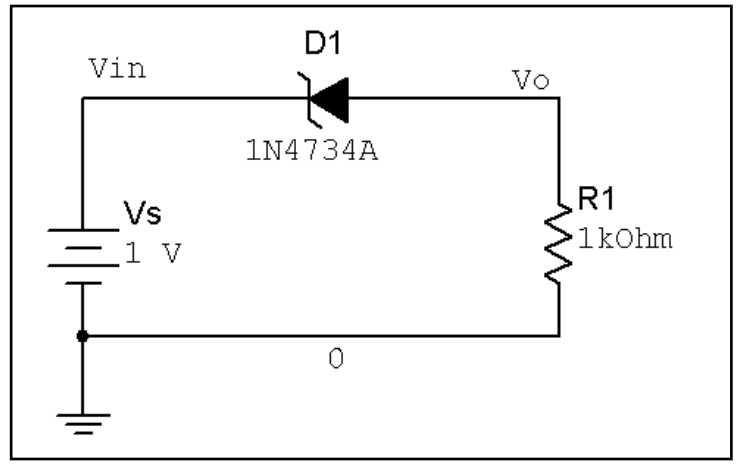


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Результат отобразится в окне **Analysis Graphs**:

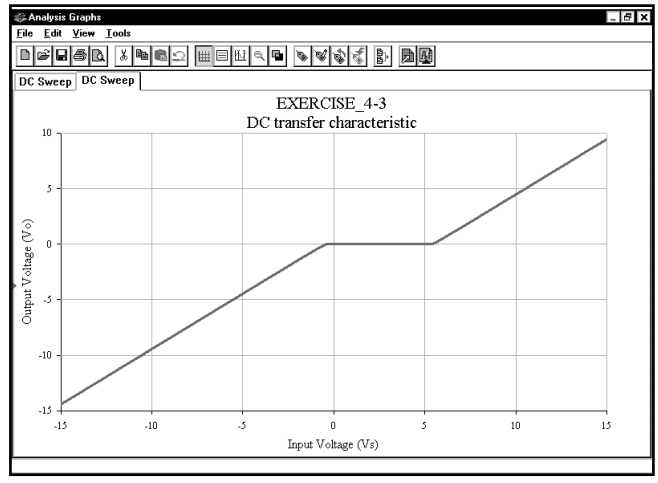


Изменим вручную ярлыки для осей x и y. Видно, что данная схема ограничивает положительное напряжение уровнем зенеровского пробоя 5,6 В, а отрицательное напряжение — уровнем прямого падения для обычного диода — 0,7 В.

УПРАЖНЕНИЕ 4-3: Получите передаточную кривую для следующей схемы:



РЕШЕНИЕ: Изменяйте напряжение источника **V1** от −15 до +15 В и настройте переменную **Vo** на отображение во время моделирования:



Обратите внимание на то, что выходное напряжение равно 0 в диапазоне входных напряжений приблизительно от −0,7 до 5,6 В.

4.3.2. Передаточная кривая для инвертора на транзисторах NMOS

Получим график передаточной кривой **Vo (Vin)** для инвертора на NMOS транзисторах, схема которого представлена ниже[2]:

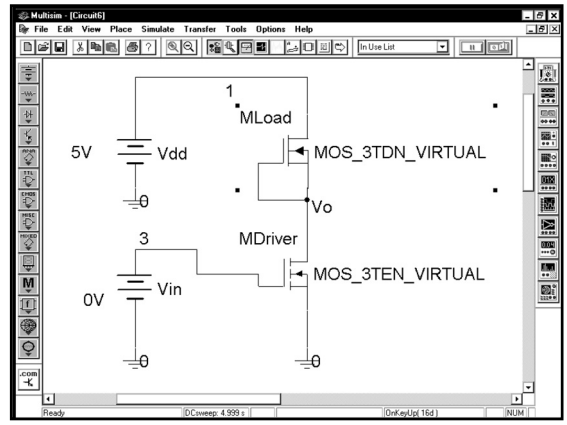


Схема содержит инвертор на NMOS транзисторах с нагрузочным транзистором MOSFET с встроенным каналом. Транзистор драйвера (driver transistor) — это транзистор MOSFET с индуцированным n-каналом, а нагрузочный транзистор (load transistor) — это транзистор MOSFET с встроенным n-каналом. В анализе SPICE эти транзисторы используют модели с одинаковыми параметрами. Функция SPICE различает транзисторы со встроенным и индуцированным каналами благодаря тому, что пороговое напряжение положительно для транзисторов индуцированным каналом и отрицательно для транзисторов с встроенным каналом. Оба типа транзисторов используют модель SPICE NMOS. Программа же Multisim использует различные символы, чтобы указать тип компонента. Для создания схемы следует использовать компоненты **MOS_3DTN_VIRTUAL** и **MOS_3TEN_VIRTUAL**. Они находятся на панели инструментов **Transistors**.

Перед тем как создавать модели транзисторов, опишем принципы их работы, а также покажем, как могут различаться стандартные равенства SPICE. Во многих руководствах работа MOSFET описывается с помощью следующих равенств:

— для области насыщения: $I_D = K(V_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda V_{DS})$,

— для линейной области: $I_D = K\left(2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2\right)(1 + \lambda V_{DS})$.

В нашем примере нагрузочный MOSFET относится к транзисторам NMOS с встроенным каналом. Его параметры: $K = 20$ мкА/В^2, $V_T = -1{,}5$ В и $\lambda = 0{,}05$ В$^{-1}$. Транзистор драйвера относится к транзисторам NMOS с индуцированным каналом. Его параметры: $K = 20$ мкА/В^2, $V_T = +1{,}5$ В и $\lambda = 0{,}05$ В$^{-1}$. Обратите внимание на то, что устройства отличаются только пороговым напряжением V_T.

Сначала создадим модели транзисторов. Стандартная модель MOSFET в SPICE использует для описания работы MOSFET следующие равенства:

— для области насыщения: $I_D = (K_P/2)(V_{GS} - V_{TO})^2(1 + \lambda V_{DS})$,

— для линейной области: $I_D = (K_P/2)\left(2(V_{GS} - V_{TO})V_{DS} - V_{DS}^2\right)(1 + \lambda V_{DS})$.

Переменные для перехода между равенствами показаны в табл. 4.1. Названия параметров в модели SPICE схожи со стандартными названиями, которые используются для описания работы MOSFET во многих руководствах. Единственное отличие состоит в том, что параметр K_P модели SPICE в два раза превышает значение K. Таким образом, в нашей модели надо использовать значение $K_P = 40$ мкА/В^2. Все остальные параметры моделей совпадают.

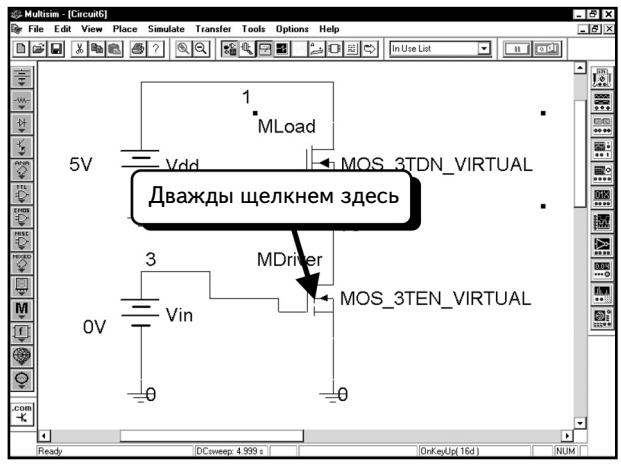
Таблица 4.1

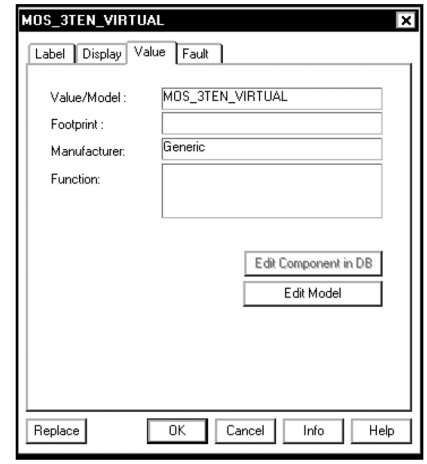
Параметры модели **SPICE**	Переменные в уравнениях
Kp	2K
VTO	V_T
lambda	λ

Создав схему, необходимо изменить модели, которые используются виртуальными компонентами. Для начала дважды щелкнем по иконке транзистора MOSFET с индуцированным каналом:

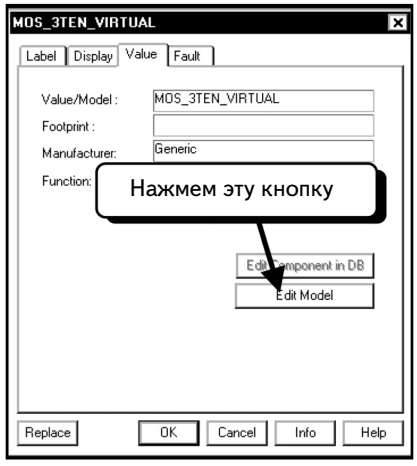
---

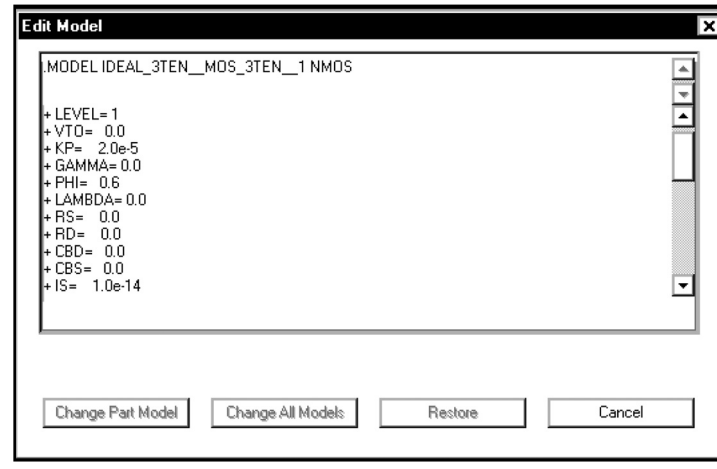
[2] Этот раздел основан на примере из программы Multisim 2001, так как библиотека MOSFET содержит ошибку. (Как только ошибка будет исправлена, данный раздел будет обновлен в соответствии с версией Multisim 7, и его можно будет найти на веб-сайте автора.)



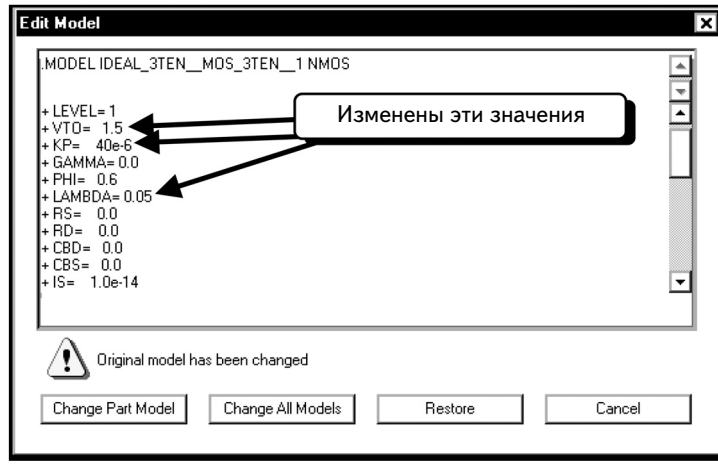


Если вкладка **Value** (**Значение**) не выбрана, щелкнем по ней. Чтобы изменить модель SPICE, нажмем кнопку **Edit Model** (**Редактировать модель**).

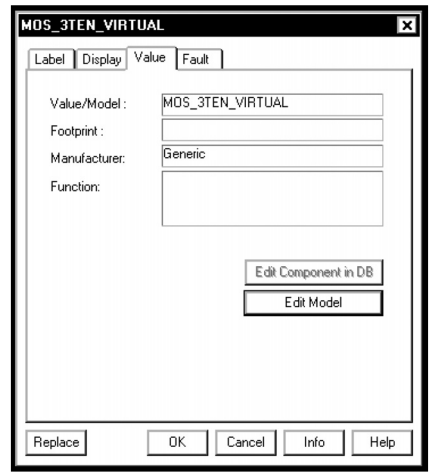




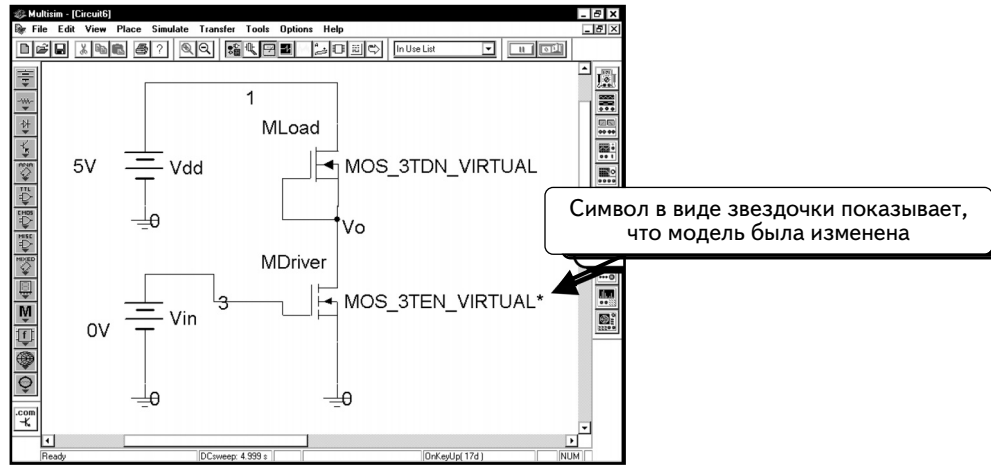
Можно изменить значения параметров, но не название модели. Изменим значение параметра **VTO** на 1,5, параметра **KP** — на 40e-6, а параметра **LAMBDA** — на 0,05.



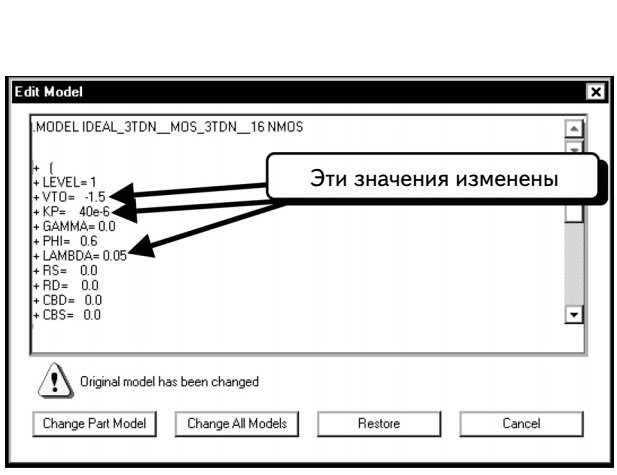
Нажмем кнопку **Change Part Model** (**Изменить модель компонента**), чтобы применить изменения к выбранному компоненту.

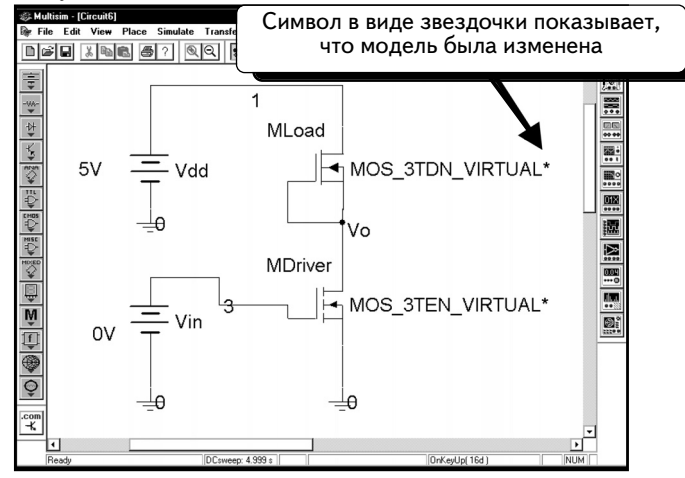


Нажмем кнопку **OK**, чтобы вернуться к схеме:



Заметим, что теперь в название модели добавился символ в виде звездочки, который показывает, что модель была изменена. С помощью данной процедуры измените модель транзистора нагрузки. Используйте следующие значения параметров: параметры **VTO**, **KP** и **LAMBDA** должны быть равны –1,5, 40e-6, и 0,05, соответственно. Ниже дано окно редактора модели, а также схема, которая получилась в итоге:

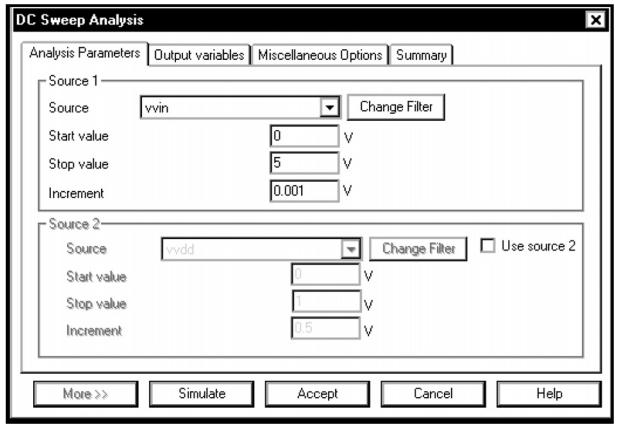


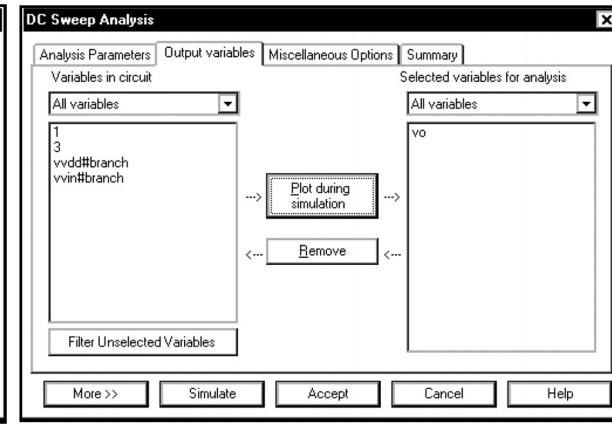


Символ в виде звездочки на схеме показывает, что модель была изменена.

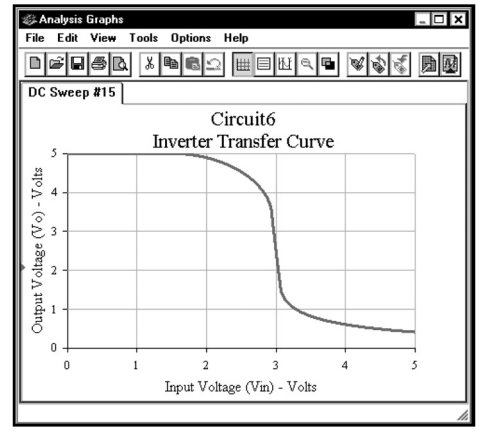
Далее настроим анализ **DC Sweep**. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep** и введем данные в диалоговом окне, как показано ниже. Напряжение **Vin** должно изменяться от **0** В до **5** В с шагом в 1 мВ.

На вкладке **Output variables** в качестве выходной величины выбрано напряжение на узле **Vo**:



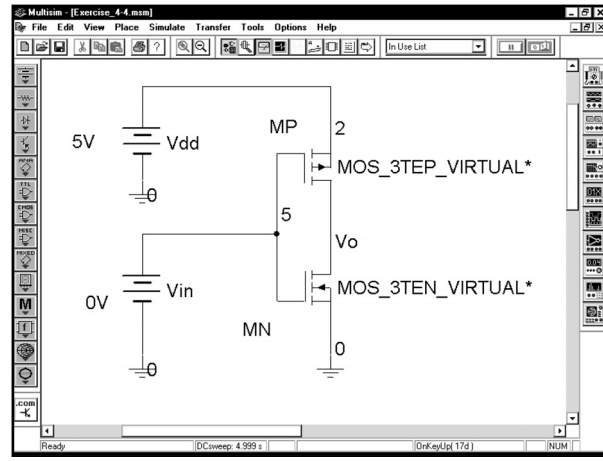


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. В следующей схеме изменены ярлыки осей и добавлена сетка:

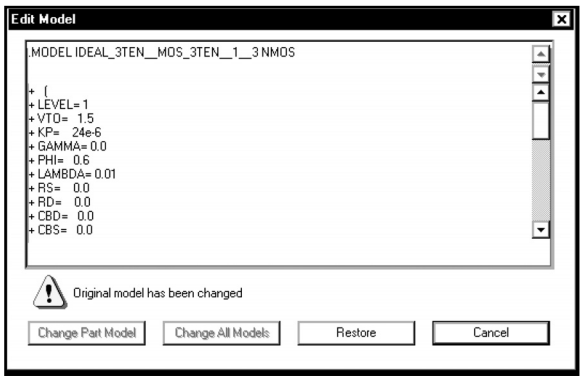


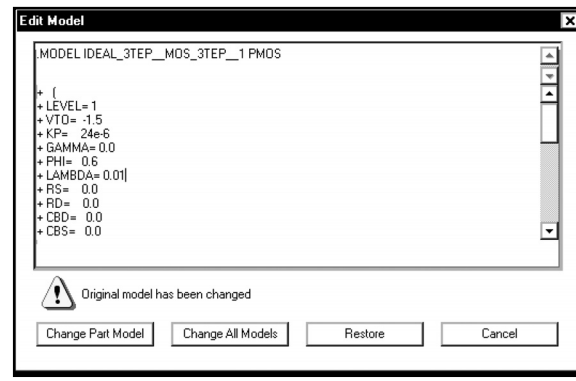
УПРАЖНЕНИЕ 4-4: Рассчитайте передаточную кривую для инвертора на КМОП-транзисторах. Верхний транзистор — это нагрузочный МОП-транзистор с индуцированным каналом p-типа, а нижний — это МОП-транзистор драйвера с индуцированным каналом n-типа. Для транзистора n-типа используйте значения K_P = 24 мкА/В^2, V_{TO} = 1,5 В и lambda = 0,01 В$^{-1}$. Для транзистора p-типа — значения K_P = 24 мкА/В^2, V_{TO} = –1,5 В и lambda = 0,01 В$^{-1}$. Для большинства технологических процессов значение параметра K_P транзисторов p-типа меньше, чем у транзисторов n-типа, поэтому разница между параметрами компенсируется путем изменения отношения ширина-длина (width-to-length) для транзисторов p- и n-типов. Значение параметра Kp определяется как (W/L)K_P. Модель Multisim не позволяет нам указать коэффициент ширина-длина, поэтому мы выбрали одинаковые значения параметра K_P для обоих транзисторов.

РЕШЕНИЕ: Создайте схему, показанную ниже:

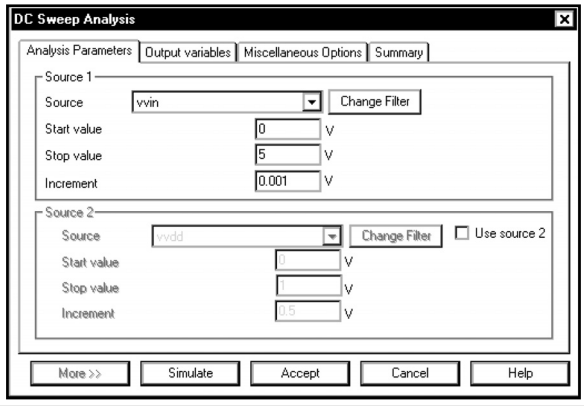


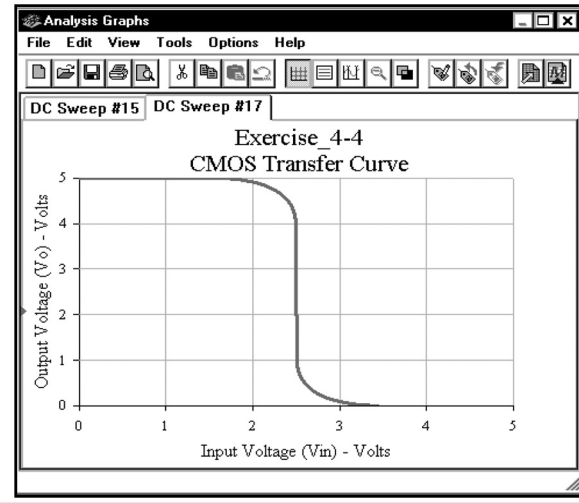
Создайте следующие модели для двух транзисторов:





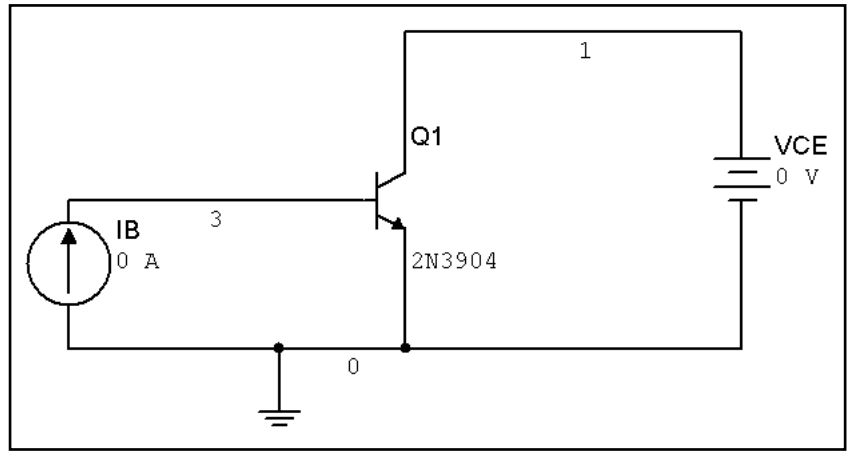
Выполните анализ **DC Sweep**, изменяя напряжение **Vin** от 0 до 5 В с шагом 0,001 В. Для инвертора CMOS требуется использовать небольшой шаг, так как изгиб кривой перехода очень крутой. Настройте переменную **Vo** как переменную выхода:



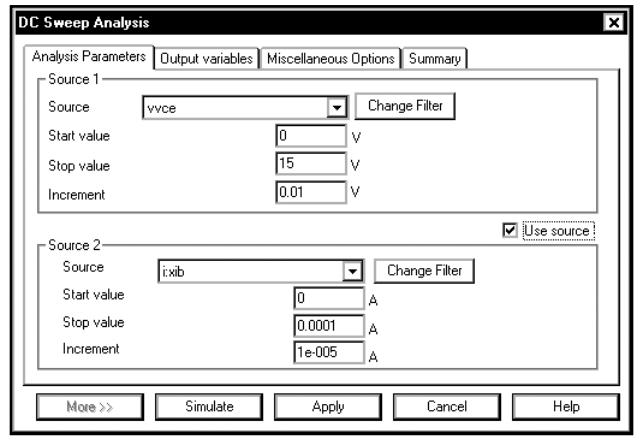


4.4. Вложенный анализ DC Sweep. Характеристики биполярного транзистора BJT

Для получения характеристик транзисторов можно использовать вложенный анализ **DC Sweep**. Покажем, как получить характеристики для полевого транзистора BJT. Создадим схему, показанную ниже:



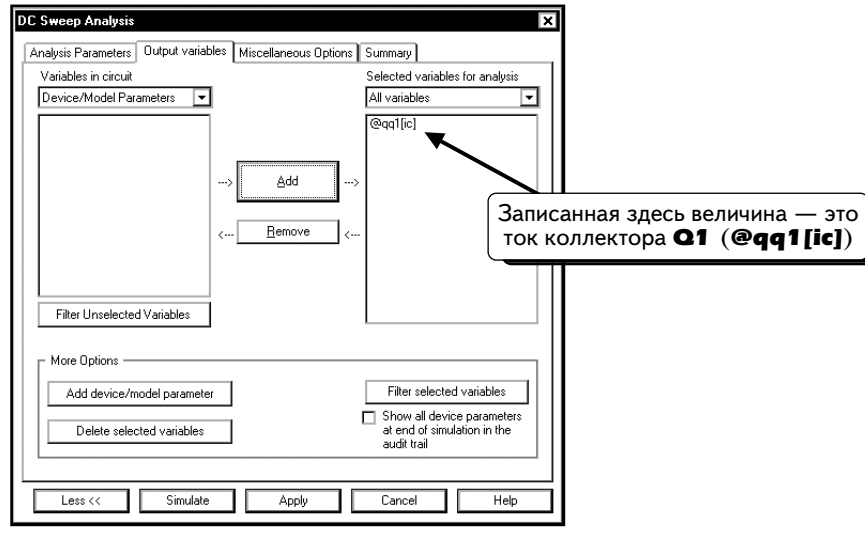
Нужно настроить вложенный анализ **DC Sweep**. Во внутреннем цикле будем изменять значение VCE от 0 до 15 В, а во внешнем цикле — значение IB от 0 до 100 мкА с шагом в 10 мкА. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep** и введем данные в диалоговом окне:



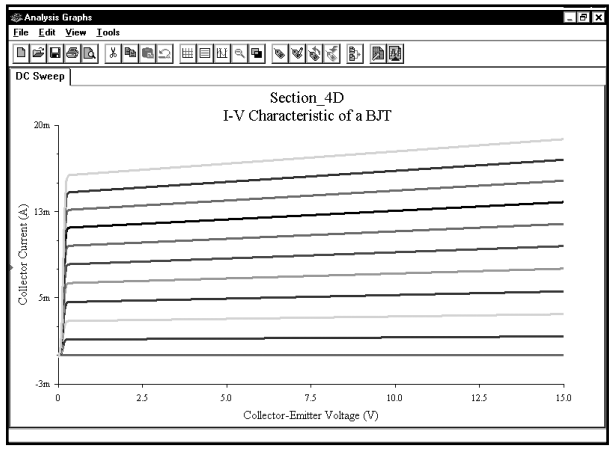
Чтобы использовать источник тока **i:xib** в качестве **Source 2**, выберем опцию **Change Filter** (**Изменить фильтр**), а потом выделим все опции. После этого источник **i:xib** станет доступен.

При использовании настроек, которые даны на верхней вкладке, при любом значении **IB** напряжение **VCE** будет изменяться от 0 до 15 В с шагом в 10 мВ. Другими словами, сначала значение тока **IB** будет равно 0, а напряжение **VCE** будет изменяться от 0 до 15 В; затем значение **IB** будет изменено на 10 мкА, а напряжение **VCE** снова будет изменяться от 0 до 15 В, и так далее. Вложенный анализ **DC Sweep** будет включать одиннадцать кривых $I_C(V_{CE})$.

Далее нужно указать выходную переменную. Нас интересует коллекторный ток I_C транзистора **Q1**. Можно отобразить значение тока двумя способами. Во-первых, можно воспользоваться процедурой, которая описана на с. 186-189, и добавить коллекторный ток **Q1** в качестве параметра компонента. Во-вторых, отметим, что ток коллектора равен току источника **VCE**. Положительный ток источника напряжения — это ток, который попадает на «плюс». Данное направление противоположно положительному току коллектора. Таким образом, чтобы отобразить ток коллектора, можно выбрать в качестве выходной переменной, отрицательное значение тока источника **VCE**. Настраивать функции без программы Postprocessor не удастся, поэтому до моделирования не получится графически отобразить отрицательное значение для тока источника. Придется выполнить моделирование, а затем создать новый график в программе Postprocessor. Добавим в график ток коллектора **Q1**, так как этот ток имеет правильное направление. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выполним процедуру, описанную на с. 186—189, чтобы добавить ток коллектора **Q1**:



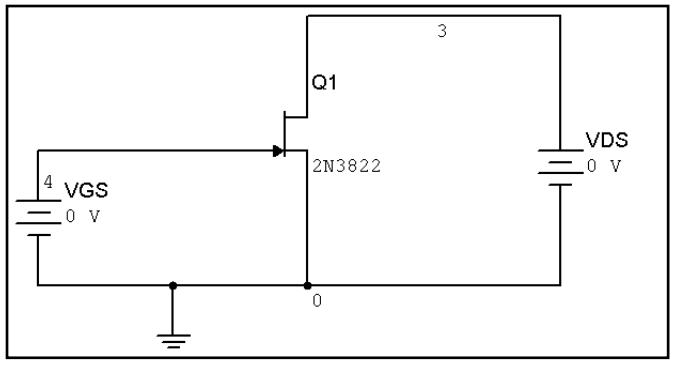
Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование и добавить ток коллектора в график. На схеме ниже показано, что после завершения моделирования заголовки были изменены:



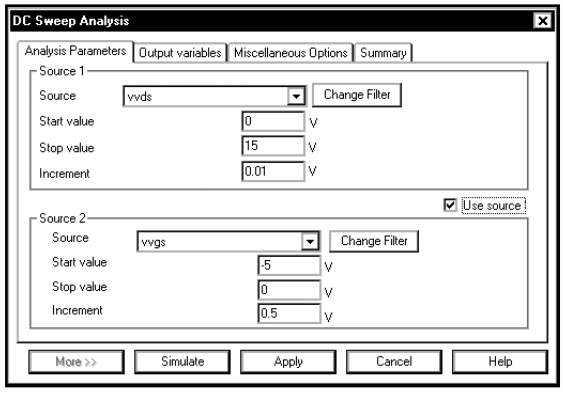
Полученные передаточные кривые представляют собой семейство выходных характеристик для транзистора 2N3904 типа NPN BJT.

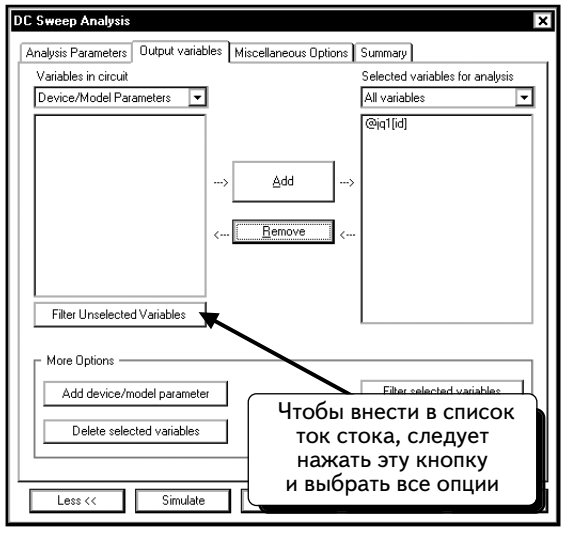
УПРАЖНЕНИЕ 4-5: С помощью вложенного анализа **DC Sweep** получите характеристики полевого транзистора 2N3821 jFET.

РЕШЕНИЕ: Создайте следующую схему:

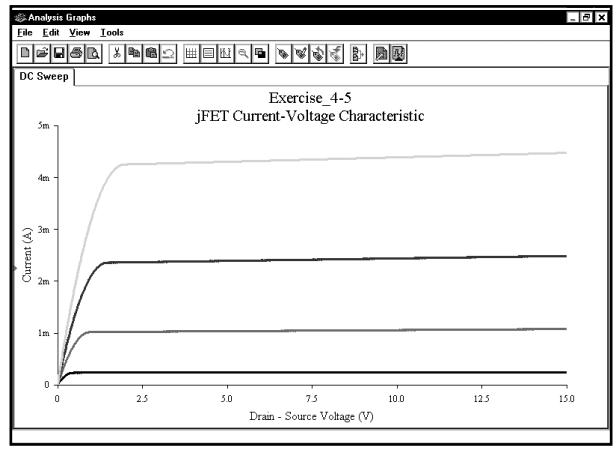


Для каждого значения **VGS** будем изменять напряжение **VDS** от 0 до 15 В. Таким образом, изменение напряжения **VDS** будет составлять внутренний цикл, соответствующий источнику 1, а напряжение **VGS** — внешний цикл, соответствующий источнику 2. Для устройств jFET нужно изменять напряжение от нуля до отрицательных значений. Введите данные в диалоговом окне анализа **DC Sweep**, как показано ниже:



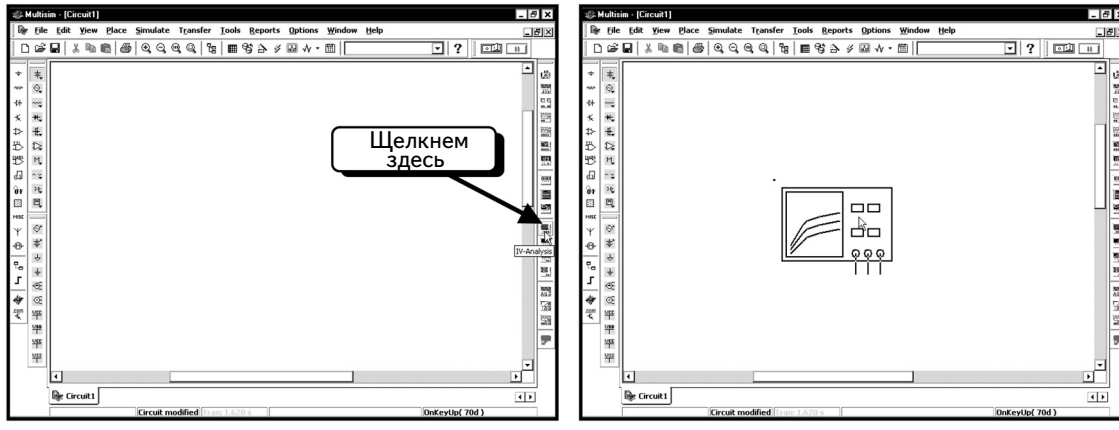


Чтобы отобразить ток стока на левой панели правого диалогового окна, нажмем кнопку **Filter Unselected Variables** (**Фильтровать переменные, которые не были выбраны**) и выделим все опции. Затем нажмем кнопку **Add device/model parameter** (**Добавить параметр устройства/модели**) и найдем параметр модели, который определяет ток стока транзистора jFET. Смоделируем схему и добавим ярлыки:

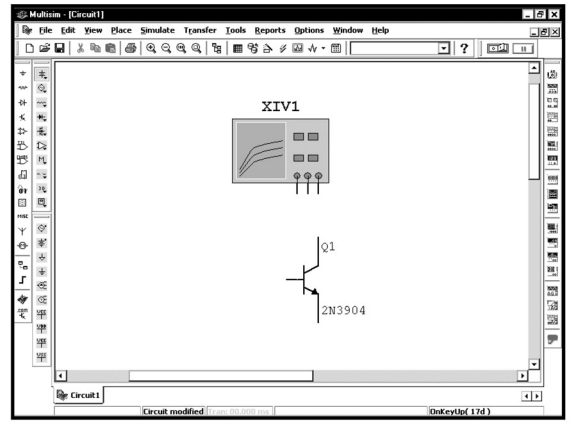


4.4.1. Получение вольтамперных характеристик биполярного транзистора BJT с помощью IV-плоттера

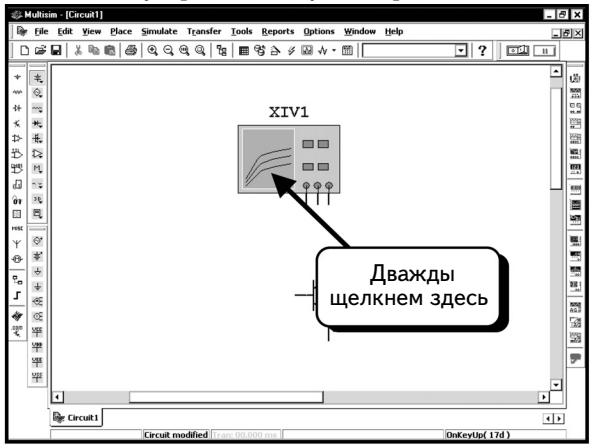
Теперь получим ВАХ транзистора 2N3904 BJT с помощью IV-плоттера — нового инструмента в версии Multisim 7. Чтобы добавить его, нажмем кнопку **IV–Analysis** (**Анализ ВАХ**) . Инструмент будет «привязан» к курсору мыши:

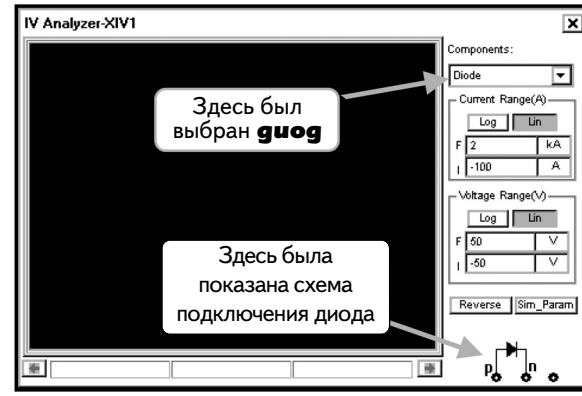


Добавим в схему этот инструмент, а также биполярный транзистор 2N3904 BJT:

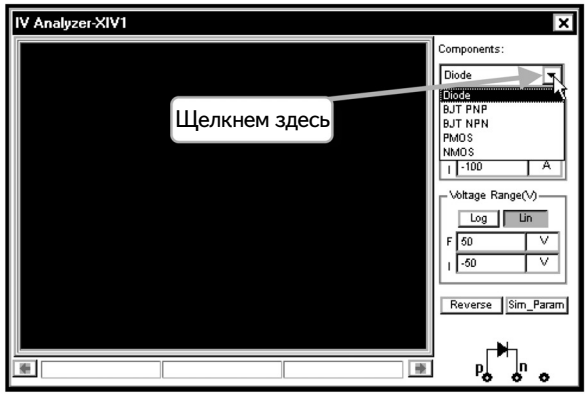


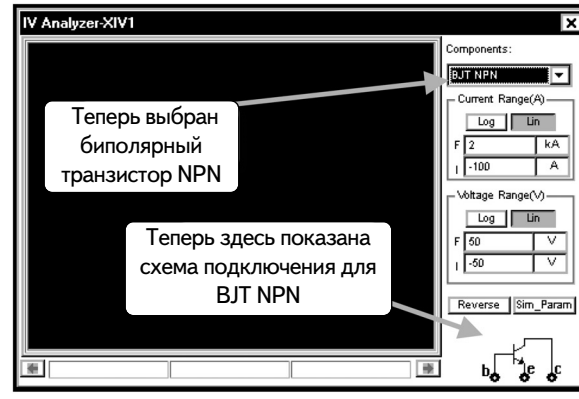
Чтобы понять, как следует соединить плоттер и транзистор, нужно открыть плоттер. С его помощью можно создавать ВАХ для устройств с двумя и тремя полюсами. Откроем инструмент двойным щелчком мыши:



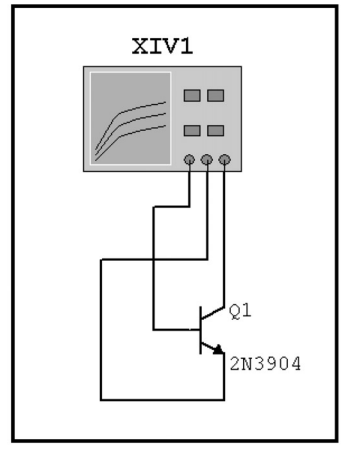


В правой нижней части экрана показано, как нужно подключить к плоттеру диод. Этот компонент всегда появляется по умолчанию. Кроме того, в поле **Components (Компоненты)** была ранее выбрана опция **Diode**. Надо изменить тип компонента на BJT NPN. Щелкнем по символу в виде треугольника и выберем тип **BJT NPN**:

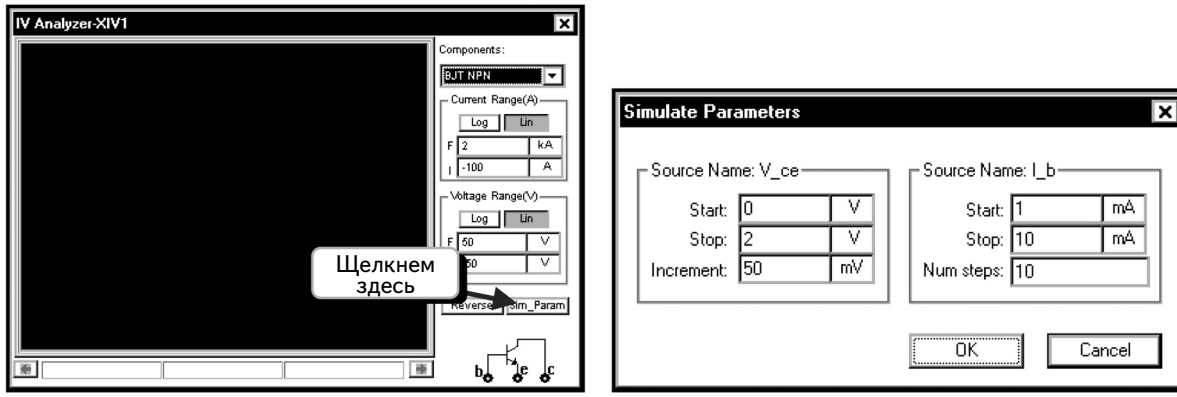




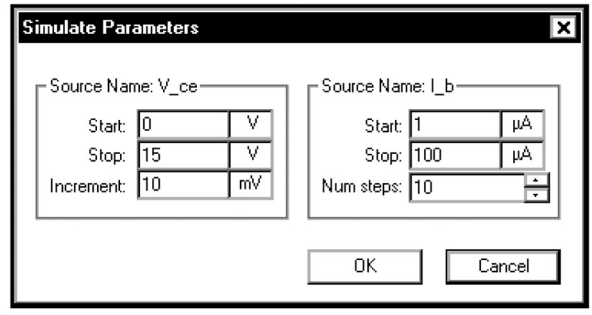
Если был правильно выбран тип исследуемого компонента, полюса для подключения будут указаны в нижней части окна. Закроем диалоговое окно и подключим устройство к инструменту:



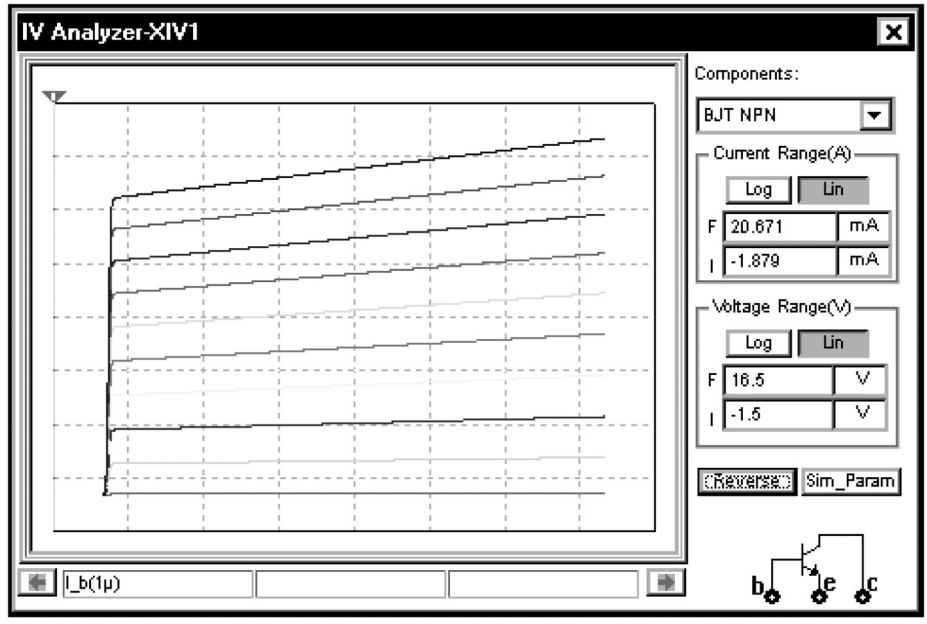
Настроим теперь параметры плоттера. Дважды щелкнем по нему и нажмем кнопку **Sim_Param (Параметры моделирования)**:



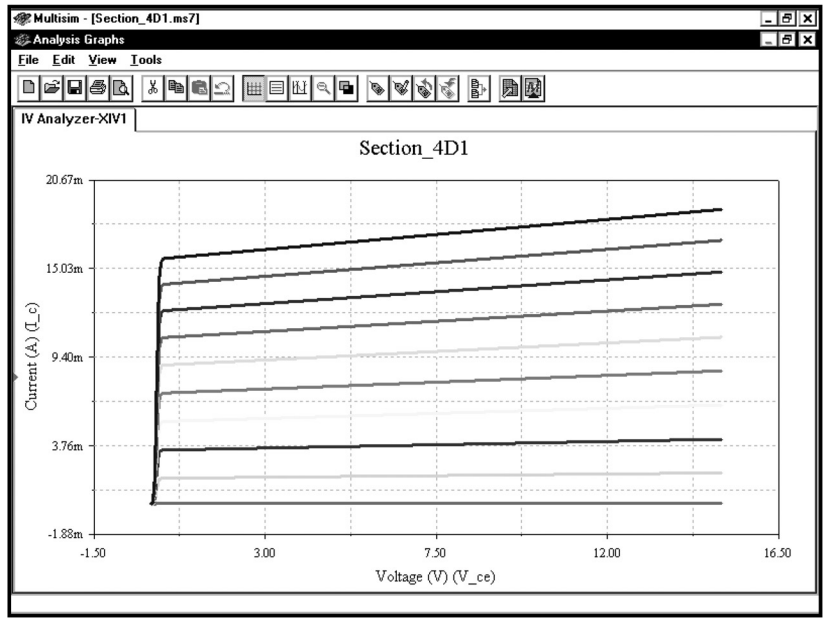
В этом диалоговом окне указаны параметры ВАХ. При получении графика ВАХ будем изменять напряжение коллектор-эмиттер (V_{CE}) от 0 до 15 В, а также ток базы от 0 до 100 мкА с шагом в 10 мкА, как мы уже делали до этого с помощью функции **DC Sweep**. Установим параметры моделирования, совпадающие с параметрами функции **DC Sweep** на (с. 212):



Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения и клавишу **F5**, чтобы начать моделирование и создать ВАХ:

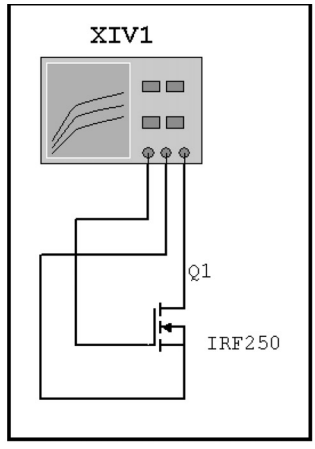


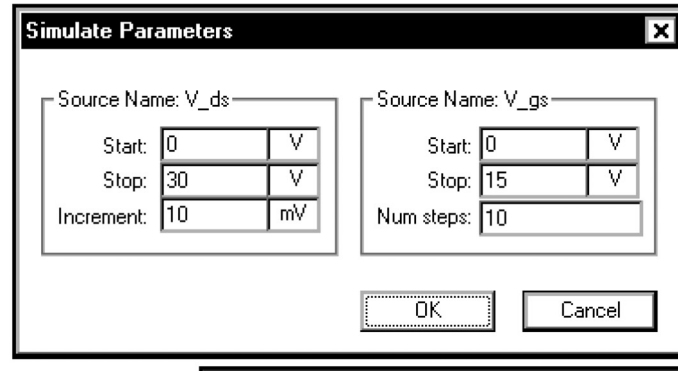
После получения ВАХ повторно нажмем клавишу **F5**, чтобы остановить моделирование. Можно также нажать клавиши **CTRL+G**, чтобы открыть окно Grapher и просмотреть график ВАХ в нем:

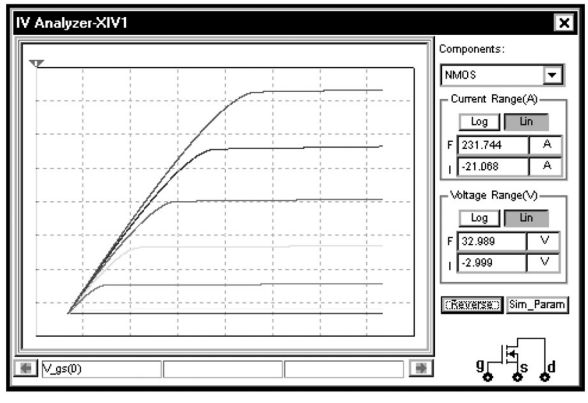


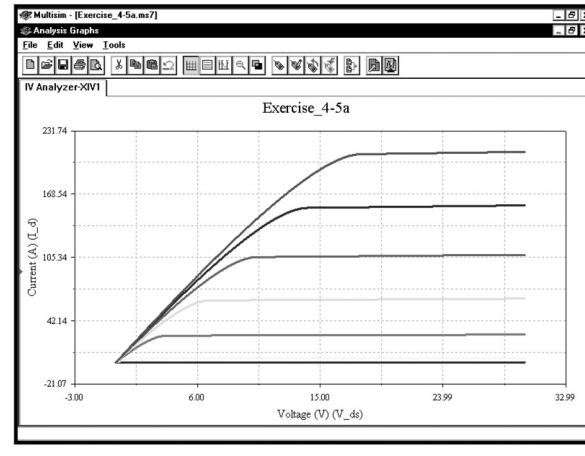
УПРАЖНЕНИЕ 4-5A: Получите характеристики мощного MOSFET IRF250 типа N с помощью IV-плоттера.

РЕШЕНИЕ:



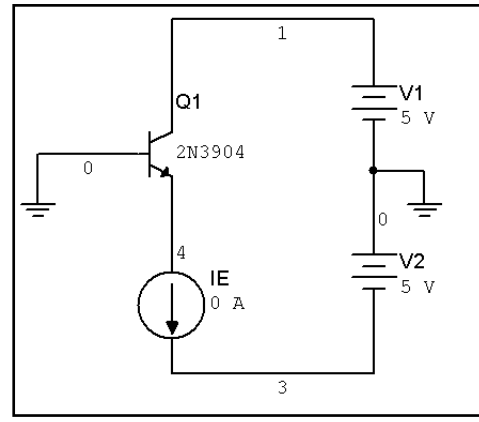






4.5. Коэффициент усиления по току для биполярного транзистора BJT

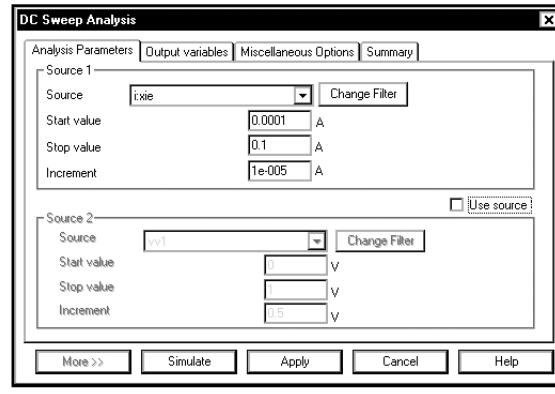
В данном разделе мы исследуем, как коэффициент усиления по току (H_{FE}) транзистора BJT зависит от тока коллектора I_{CQ} и напряжения смещения эмиттер-коллектор на постоянном токе V_{CEQ}. Во всех примерах моделирования будет применяться схема, показанная ниже. Перед выполнением моделирования можно выйти из программы Multisim, а потом снова ее запустить:



В этой схеме использованы приближенные соотношения: $I_C \cong I_E$ и $V_{CE} = V_1 + V_{BE} \cong V_1$. Данные соотношения необходимы, так как мы не можем непосредственно изменять ток коллектора. Однако кривые на графике будут такими же, как если бы мы изменяли ток коллектора.

4.5.1. Зависимость коэффициента усиления H_{FE} от тока эмиттера

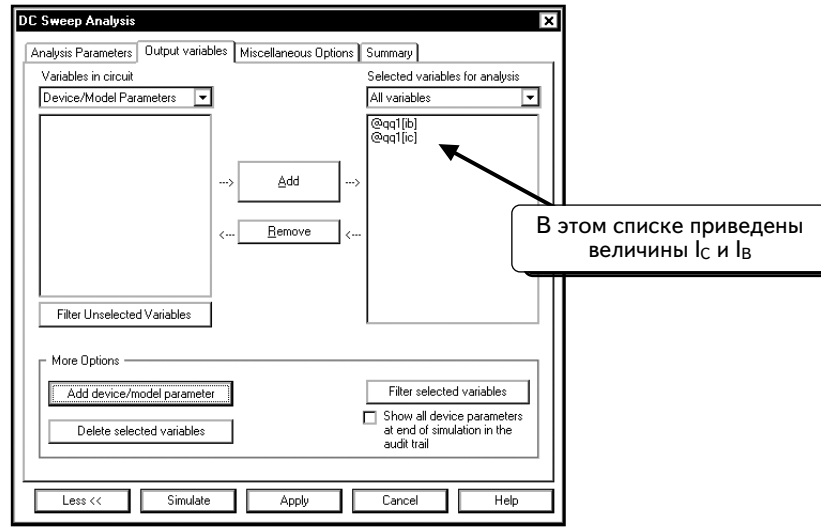
Первый анализ посвящен получению графика зависимости коэффициента усиления H_{FE} транзистора от тока эмиттера в рабочей точке[3]. Во многих схемах необходимо использовать транзистор с максимальным усилением по току. На графике будет видно, как следует выбирать рабочую точку по току эмиттера при максимальном усилении, затем можно использовать это значение для смещения транзистора. Такой график просто сформировать с помощью анализа **DC Sweep**. Создадим кривую, для которой значение V_{CE} равно примерно 5,7 В (при условии, что значение $V_{BE} \approx 0{,}7$ В). Заметим, что для источника V_1 значение V_{CE} является почти постоянным, поэтому мы не будем его изменять во время моделирования. При изменении тока значение V_{BE} будет немного изменяться, но предполагается, что подобное изменение будет незначительным. Создадим схему, показанную выше, и выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep**. Введем в диалоговом окне данные, как показано ниже. Нажмем кнопку ***Change Filter*** для источника ***Source 1*** и включим все опции, чтобы настроить для параметра ***Source*** (**Источник**) значение ***i:xie***:



Будем изменять ток эмиттера от 100 мкА до 100 мА с шагом в 10 мкА.

[3] Я благодарю за этот пример Джона Д. Уэлкса (John D. Welkes) из Государственного университета штата Аризоны.

Чтобы графически отобразить коэффициент усиления по току DC, следует показать отношение I_C/I_B в программе Postprocessor. Так как обычно данные о токе недоступны для программы Postprocessor, придется указать переменные в разделе **Output variables.** Щелкнем по вкладке **Output variables** и выполним процедуру, описанную на с. 186–189, чтобы добавить в список кривые базового и коллекторного токов:



Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Откроется окно **Analysis Graphs**, в котором отобразятся базовый и коллекторный токи:

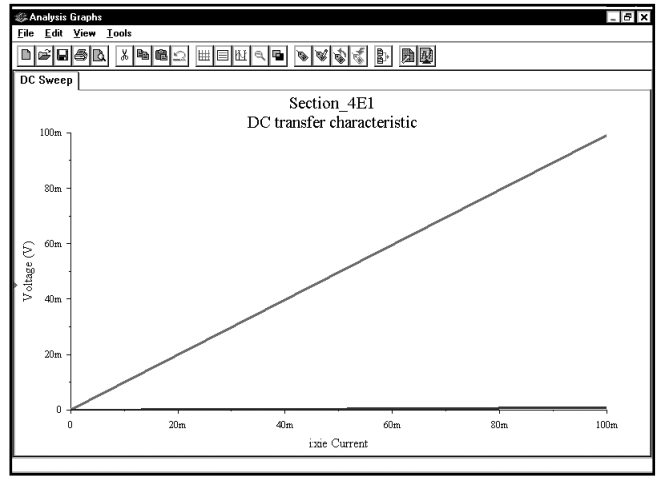
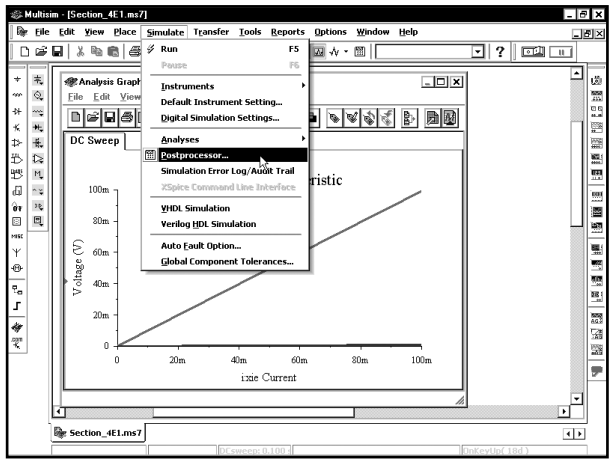
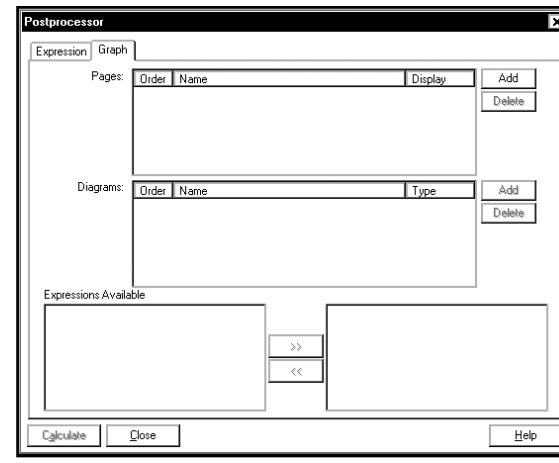
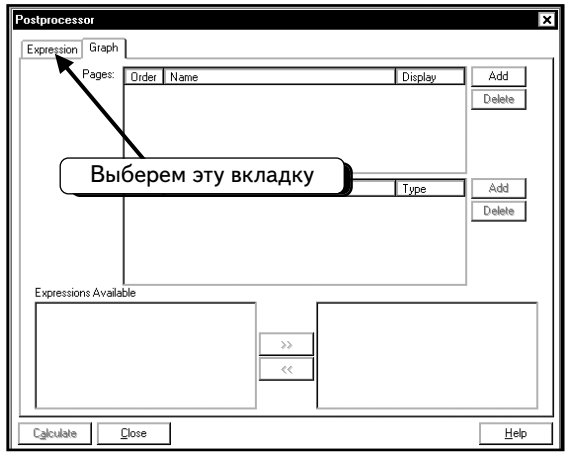


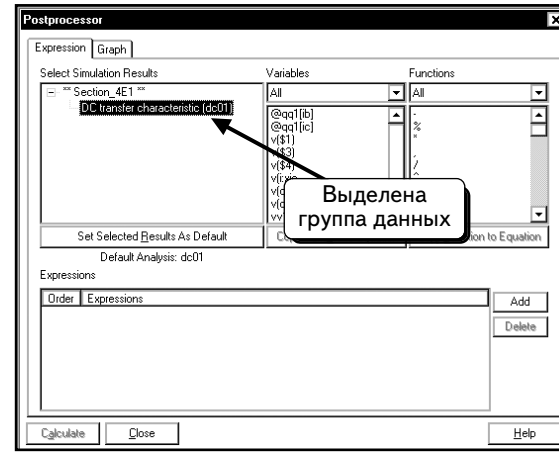
График показывает, что моделирование проведено. Однако это не та кривая, которую необходимо получить. Для создания графика I_C/I_B необходимо использовать программу Postprocessor. Выберем в меню пункты **Simulate** ⇒ **Postprocessor**:





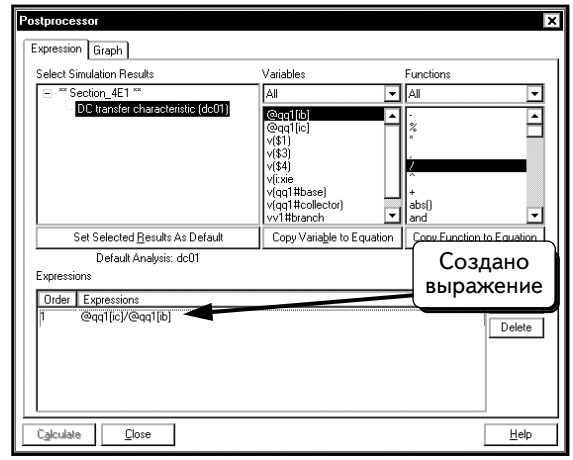
Окно Postprocessor пусто. Но в вашем окне могут находиться страницы, созданные в ходе предыдущих сеансов моделирования. Надо удалить все старые страницы. Щелкнем по вкладке **Expression**:



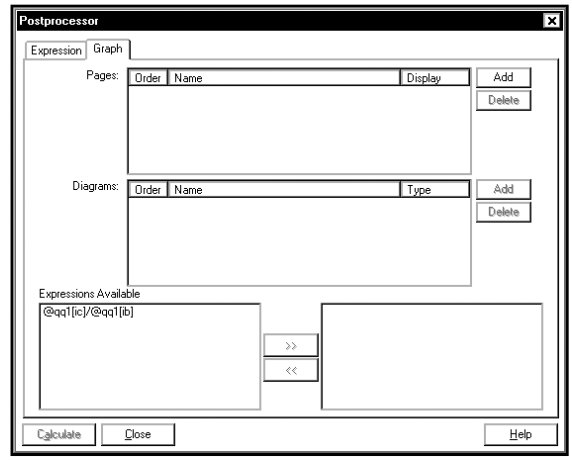


Если вы уже несколько раз выполняли моделирование, то в окне отобразятся доступные группы данных. Для этой демонстрации программа Multisim перезапущена, чтобы в окне осталась только одна группа данных. Эта группа сразу была выделена в окне. Перед тем как продолжить, необходимо выбрать нужную группу данных.

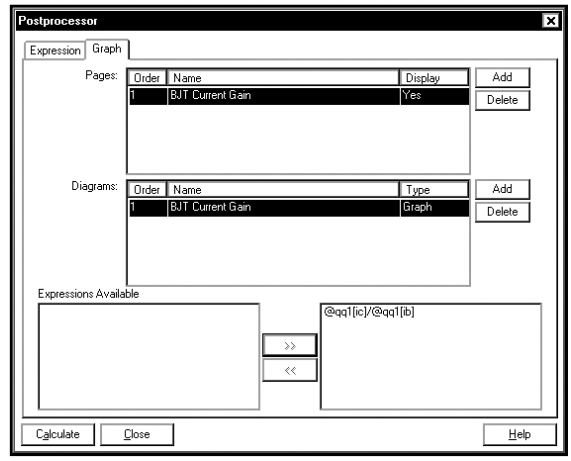
Далее необходимо создать выражение для I_C/I_B. Нажмем кнопку **Add** и скомпануем выражение **@qq1[ic]/@qqr[ib]**. Ваше выражение может немного отличаться:



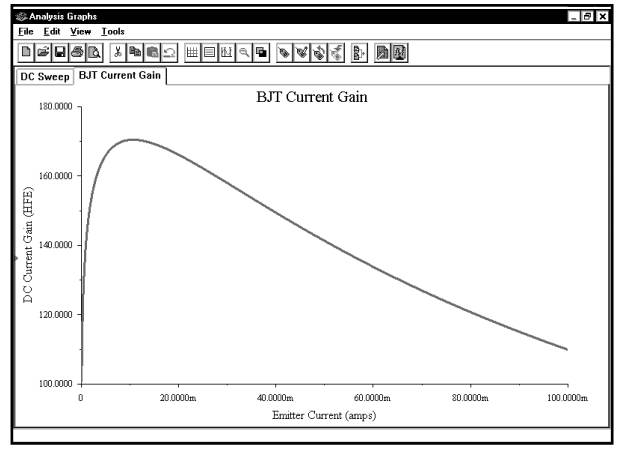
Щелкнем по вкладке **Graph** (**График**):



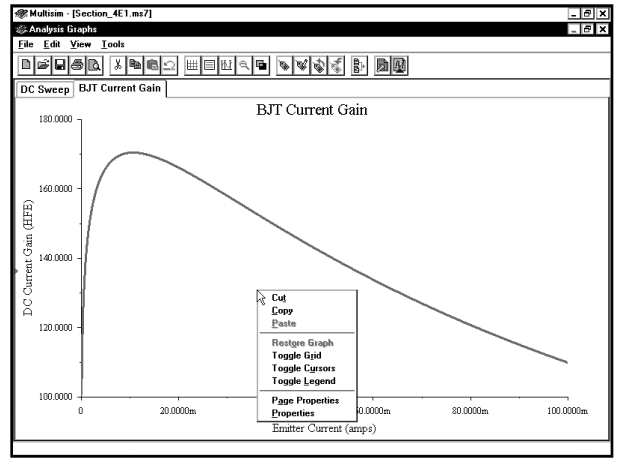
Как создавать новые кривые в программе Postprocessor, описано в разделах 2.1—2.3. **Перед тем как продолжить, удалите все старые страницы. В противном случае программа Multisim попытается отобразить их на графике. Если необходимые данные не будут найдены, это приведет к ошибке в программе.** Нажмем кнопку ***Add***, чтобы создать новую страницу. Добавим на страницу новую диаграмму с выражением I_C/I_B:



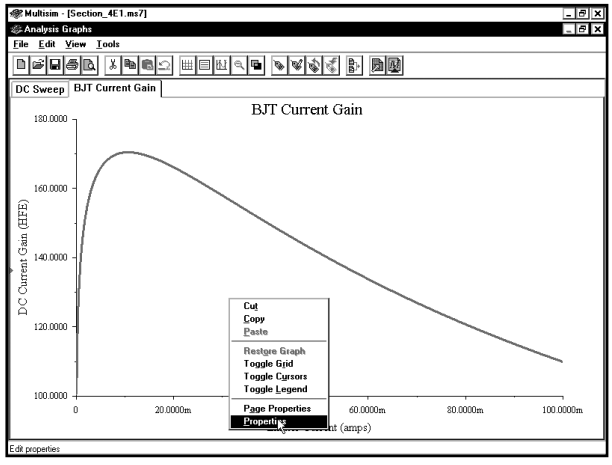
Нажмем кнопку ***Calculate***, чтобы отобразить кривую на графике. В окне ниже показан график с измененными ярлыками:

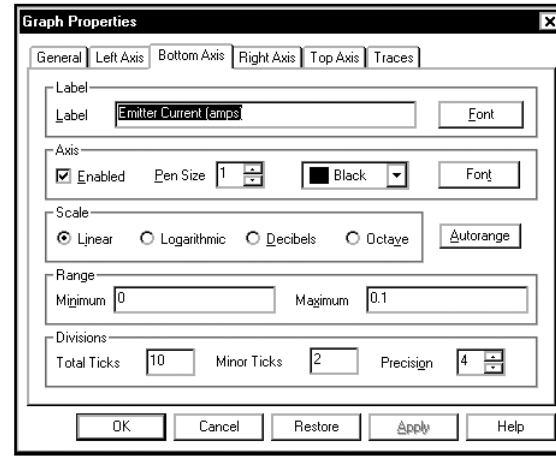


Это не тот график, который нам нужен. Мы хотим настроить ось x на логарифмический масштаб. Щелкнем по графику ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши, чтобы изменить его:

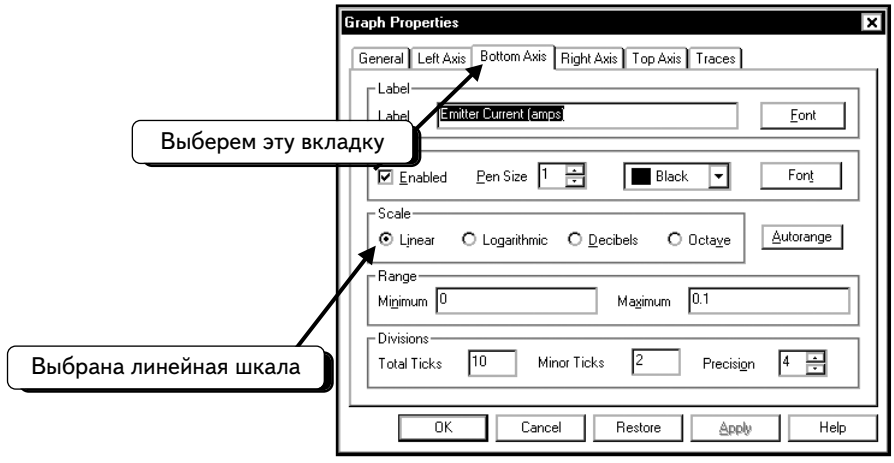


Выберите пункт **Properties**:

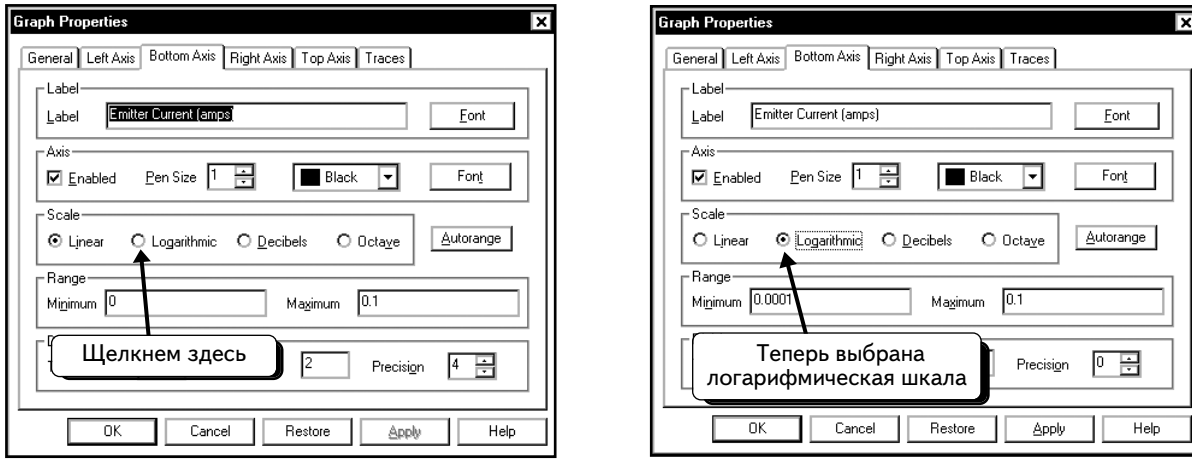




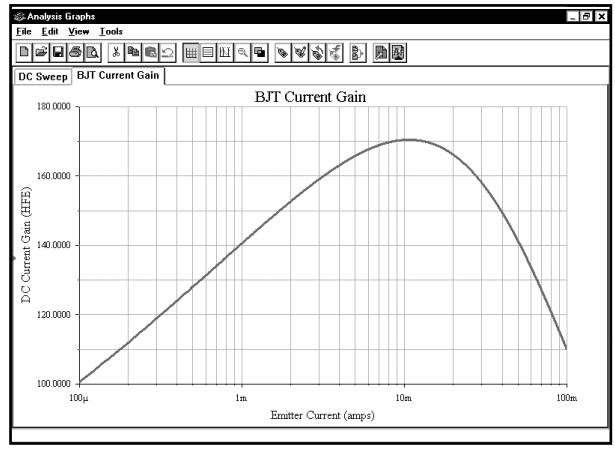
Если вкладка **Bottom Axis** (**Нижняя ось**) не выбрана, щелкнем по ней:



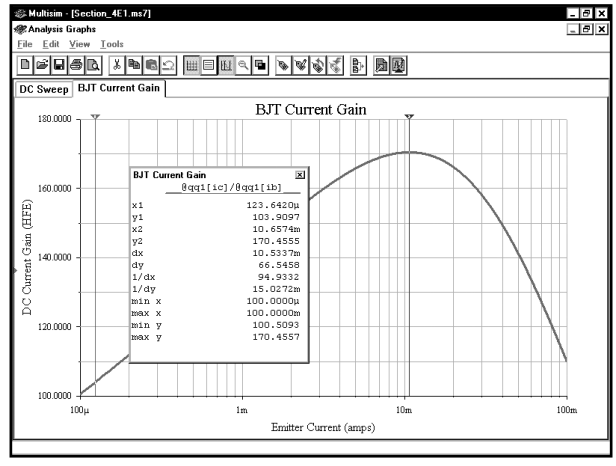
На вкладке выше ось x (горизонтальная ось) настроена как **Linear** (**Линейная**). Следует заменить ось логарифмической, поэтому щелкнем по символу в виде окружности ○ рядом с опцией **Logarithmic** (**Логарифмическая**). В окружности появится точка ◉; это значит, что опция выбрана:



Нажмем кнопку **OK**, чтобы просмотреть результаты. Добавим также сетку, щелкнув по графику ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выбрав пункт **Toggle Grid**:

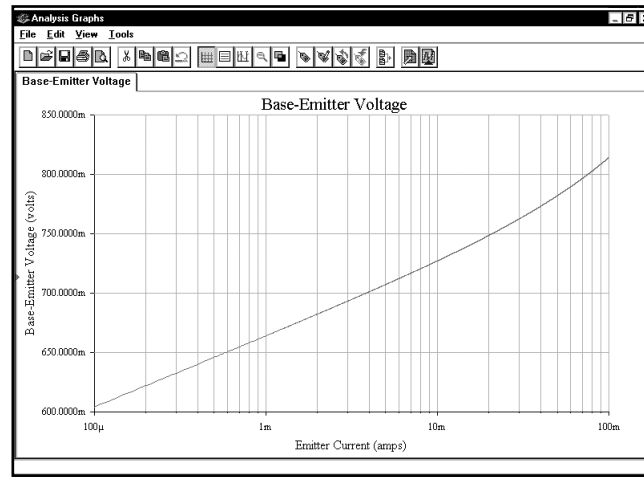


Активировав курсоры, мы увидим, что максимальное усиление по току равно **170.4555**. Такое усиление соответствует току эмиттера в 10,5 мА:



Предполагается, что в нашем анализе значение V_{BE} постоянно. Чтобы проверить, не допущена ли ошибка, нужно теперь получить график зависимости напряжения база-эмиттер от эмиттерного тока.

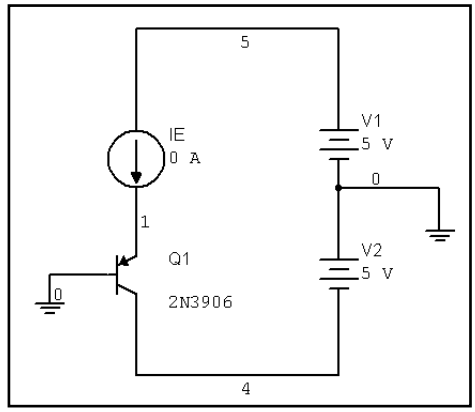
В нашей схеме значение V_{BE} равно напряжению узла **4**, взятому со знаком «минус»:

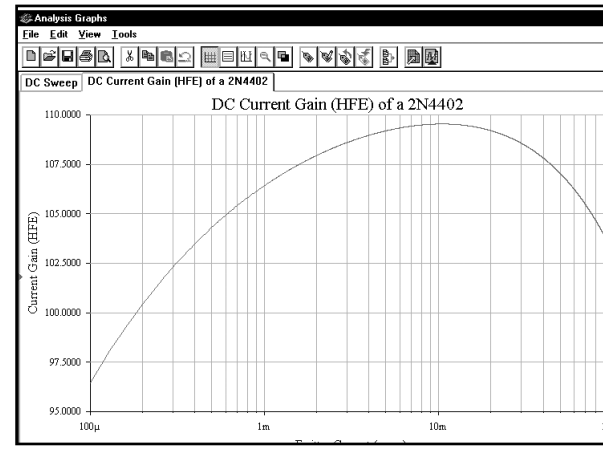


Как видим, при изменении тока эмиттера от 100 мкА до 100 мА значение V_{BE} колеблется в пределах 200 мВ. Это показывает, что значение V_{BE} достаточно постоянно и, следовательно, значение V_{CE} тоже постоянно, так как оно равно разности **V1** и V_{BE}.

УПРАЖНЕНИЕ 4-6: Для транзистора 2N4402 PNP BJT определите ток коллектора при максимальном значении H_{FE}. Отобразите максимальное значение H_{FE} и ток эмиттера. Значение V_{EC} равно 5,7 В.

РЕШЕНИЕ: Используйте схему, с которой вы работали в предыдущем примере. Добавьте в схему транзистор 2N4402:

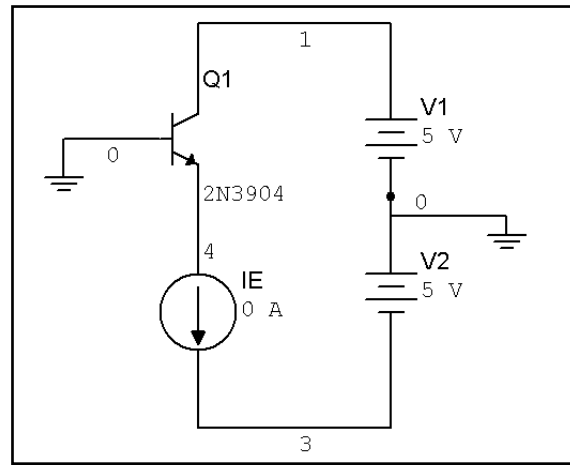




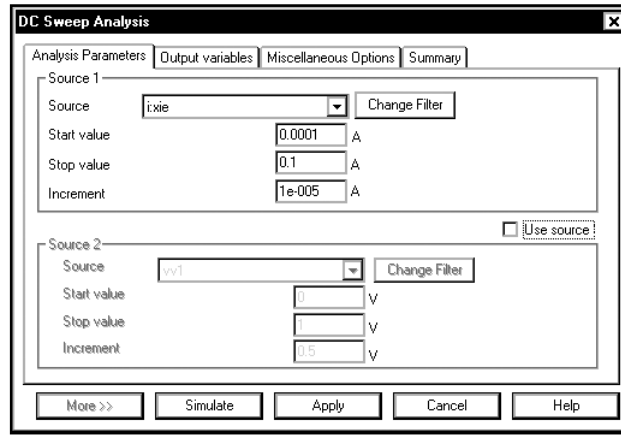
4.5.2. Зависимость коэффициента усиления H_{FE} от тока I_C при различных значениях V_{CE}

Рассмотрим далее, как изменяется кривая зависимости H_{FE} (I_E) при различных значениях напряжения коллектор-эмиттер. В предыдущем примере кривая была построена при условии, что $V_{CE} \cong 5{,}7$ В. Теперь создадим три кривые при различных значениях параметра V_{CE} и отобразим их на одном графике. Для кривых будем использовать значения $V_{CE} \cong$ 5, 10 и 15 В.

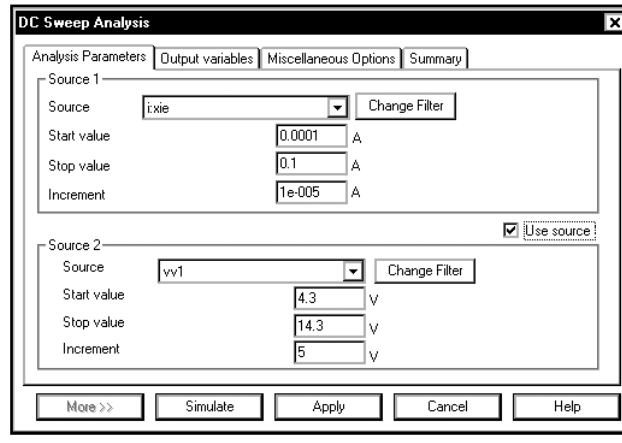
Повторим схему, с которой мы работали в предыдущем разделе:



Выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **DC Sweep**, чтобы открыть диалоговое окно:

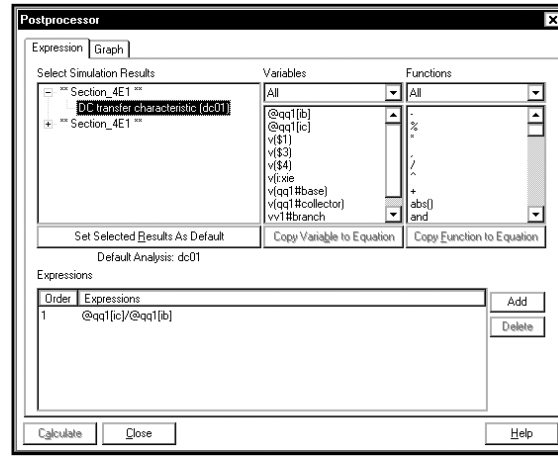


В диалоговом окне сохранились настройки предыдущего сеанса, поэтому нам остается лишь указать параметры вложенного анализа. Настроим источник ***Source 2*** для управления значением V_{CE} (в данном случае оно равно ***V1***). Укажем данные для второго источника, как показано ниже:

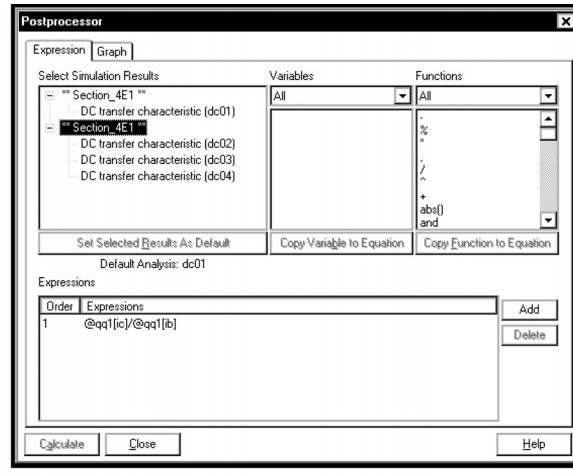


Все прочие настройки, включая параметры ***Output variables***, должны соответствовать настройкам предыдущего сеанса моделирования. Если это не так, щелкнем по вкладке ***Output variables***, как мы это делали в разделе 4.5.1.

Выполним моделирование, откроем окно Postprocessor и щелкнем по вкладке **Expressions:**

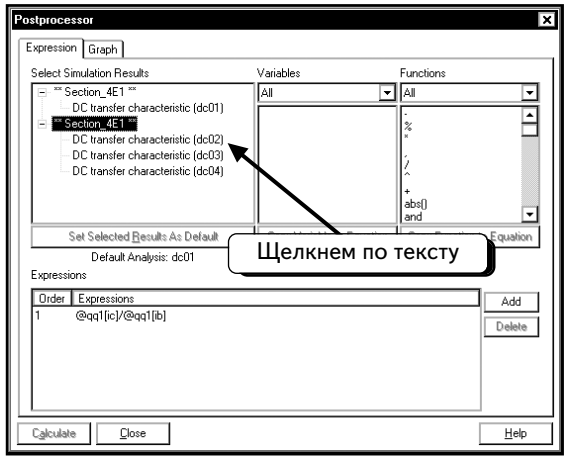


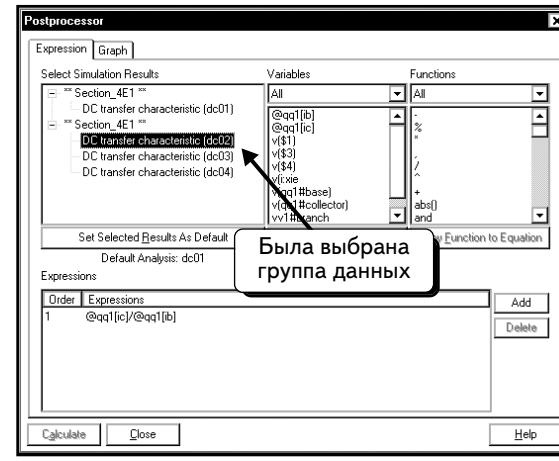
В диалоговом окне отображены две группы данных (так как выполнены два сеанса моделирования после запуска программы Multisim). В последнем сеансе использовалась схема, названая **Section_4E1** из раздела 4.5.1, которая содержит две группы данных. Внизу в списке находится группа данных из последнего сеанса моделирования. Если развернуть список, то можно увидеть, что последняя группа данных включает три сеанса анализа **DC Sweep**:



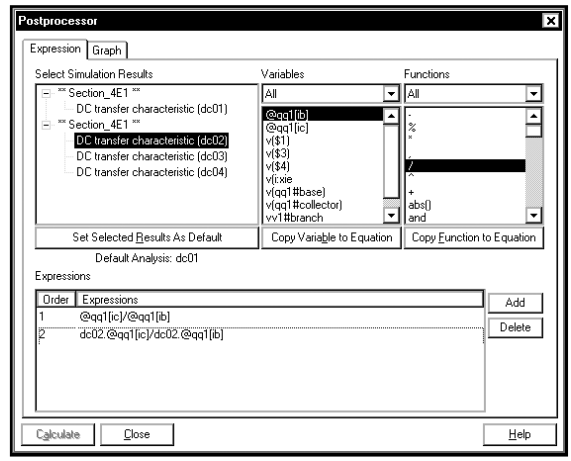
При настройке вложенного анализа **DC Sweep** мы несколько раз выполним анализ тока эмиттера. В списке указаны все сеансы анализа. Это — три сеанса, которые включают анализ для значений V_{CE}, равных 4,3, 9,3 и 14,4 В. Теперь можно получить графики для любого сеанса, а также любую комбинацию кривых.

Щелкнем по группе данных, чтобы развернуть ее:



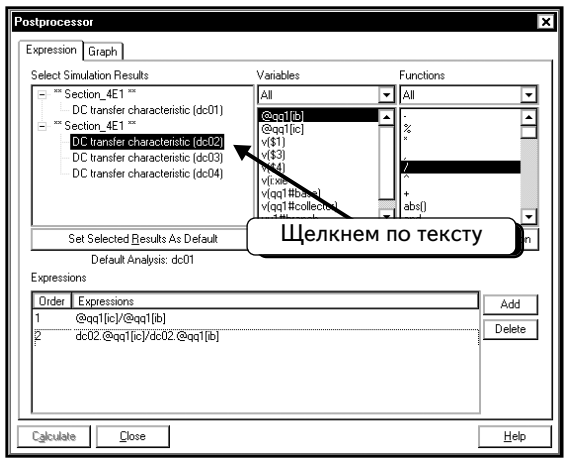


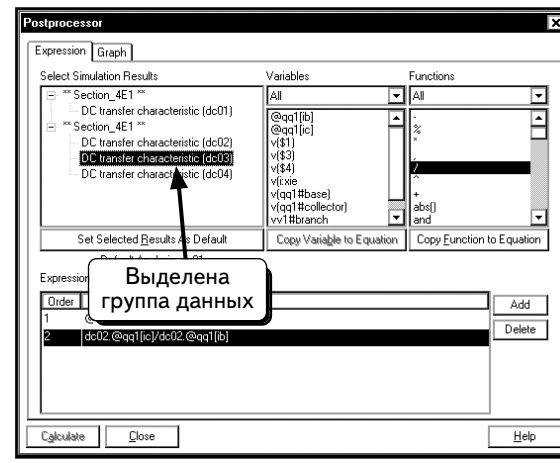
Нажмем кнопку **Add** и создадим выражение для I_C/I_B :



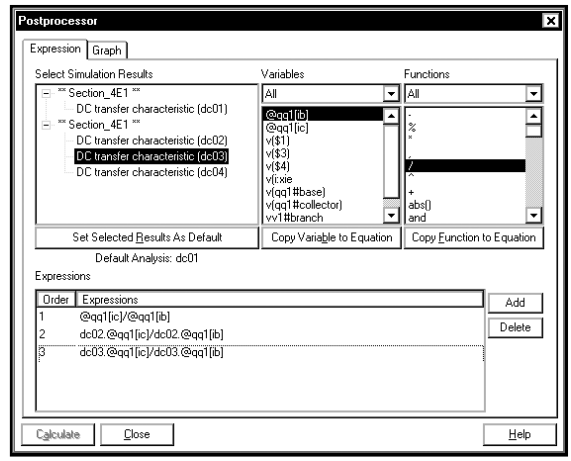
Заметим, что выражение выглядит как **dc02.@qq1[ic]/dc02.@qq1[ib]**. Текст «**dc02**» указывает на группу данных из анализа 02, а выражение «**qq1[ic]**» определяет коллекторный ток для транзистора q1 в этой группе.

Добавленное выражение связано только с одним значением V_{CE}. Чтобы создать кривые для трех значений V_{CE}, нам необходимо добавить еще два выражения. Щелкнем по пункту в списке, чтобы выбрать второе значение V_{CE} для моделирования:



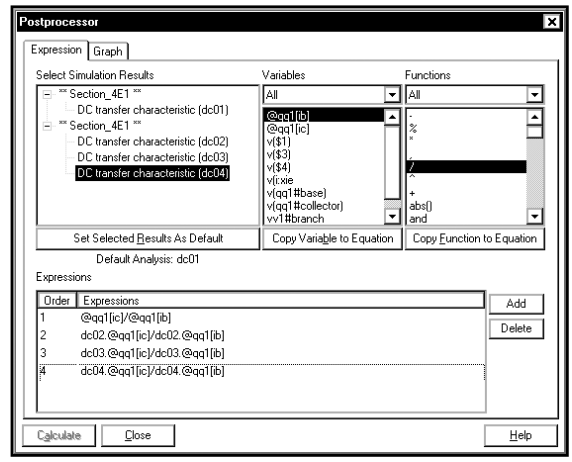


Далее создадим выражение `dc03.@qq1[ic]/dc03.@qq1[ib]`:



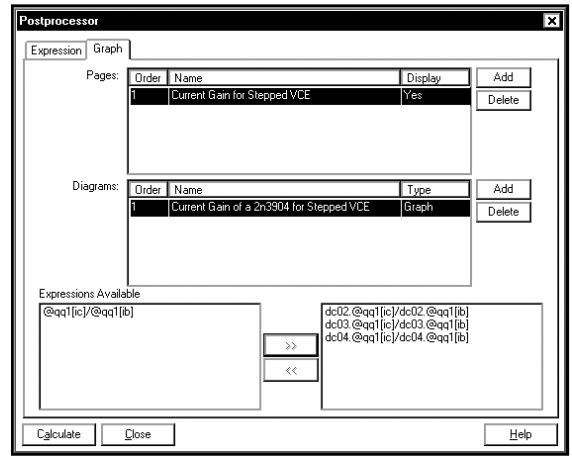
Заметим, что обозначение данной кривой отличается от обозначения предыдущей кривой только префиксом **dc03**, который указывает на третий анализ **DC Sweep**, в котором с используются значения $V_{CE} \cong 5$ В, $V_{CE} \cong 10$ В и $V_{CE} \cong 15$ В.

Повторим процедуру, чтобы добавить третье выражение:

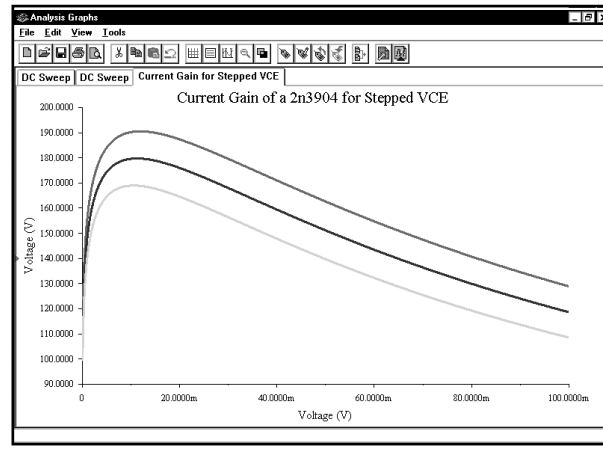


Это третье выражение — ***dc04.@qq1[ic]/dc04.@qq1[ib].***

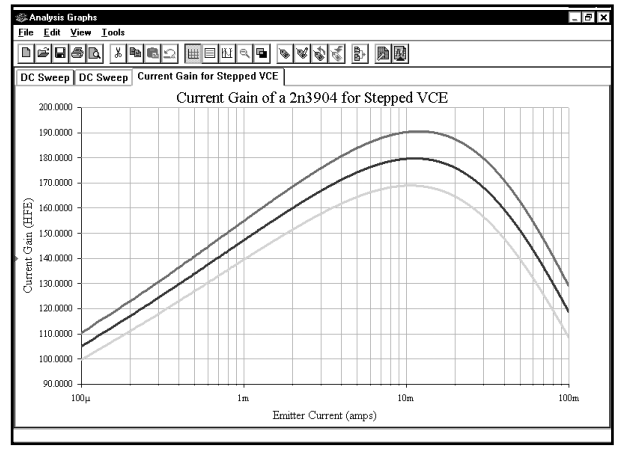
Приступим к созданию графика, выбрав вкладку Graph. Добавим новую страницу и график в программе Postprocessor, а затем добавим в новый график три кривые, которые были только что созданы:



Нажмем кнопку ***Calculate***, чтобы получить графики:



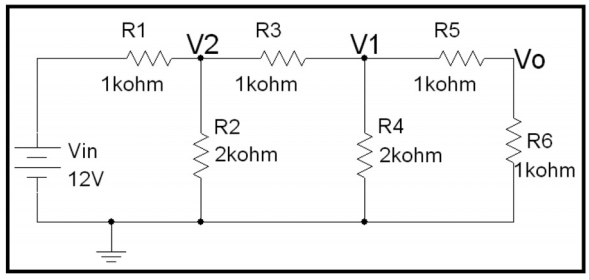
Изменим ярлыки осей, а также настроим ось x на логарифмический масштаб:



Как видно из графика, значение V_{CE} не влияет на значение коэффициента усиления по току H_{FE}. Точка смещения (bias point) определяет ток коллектора (I_C) и напряжение эмиттер-коллектор (V_{CE}); эти параметры влияют на работу транзистора. Если мы хотим настроить транзистор на максимальное значение H_{FE}, кривая на графике может использоваться для выбора соответствующих настроек V_{CE} и I_C.

4.6. Задачи

Задача 4.1. Получите зависимость напряжения Vo от Vin при изменении значения Vin от –10 до 15 В для следующей схемы:



Задача 4.2. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость напряжения V1 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 15 В.

Задача 4.3. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость напряжения V2 относительно Vin при изменении значения Vin от 0 до 25 В.

Задача 4.4. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость суммы напряжений V1 и V2 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 25 В.

Задача 4.5. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость напряжения на резисторе R3 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 25 В.

Задача 4.6. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость отношения Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin в диапазоне от 0 до 7 В.

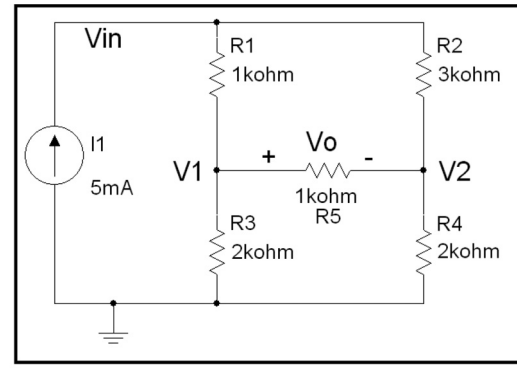
Задача 4.7. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость напряжения на резисторе R1 от Vin при изменении значения Vin от –8 до 16 В.

Задача 4.8. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость напряжения на резисторе R3 от Vin при изменении значения Vin от –10 до 10 В.

Задача 4.9. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость мощности, рассеиваемой резистором R1, от Vin при изменении значения Vin от –25 до 25В.

Задача 4.10. Для схемы из задачи 4.1 получите зависимость мощности источника напряжения Vin от Vin при изменении значения Vin от –25 до 25 В.

Задача 4.11. Получите зависимость напряжения Vo от I1 при изменении значения I1 от –10 до 15 мА для следующей схемы:



Задача 4.12. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость напряжения V1 от I1 при изменении значения I1 от 0 до 15 мА

Задача 4.13. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость напряжения V2 от I1 при изменении значения I1 от 0 до 25 мА.

Задача 4.14. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость суммы напряжений V1 и V2 от I1 при изменении значения I1 от 0 до 25 мА.

Задача 4.15. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость напряжения резистора R3 от I1 при изменении значения I1 от 0 до 25 мА.

Задача 4.16. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость коэффициента Vo/Vin от I1 при изменении значения I1от 0 до 7 мА.

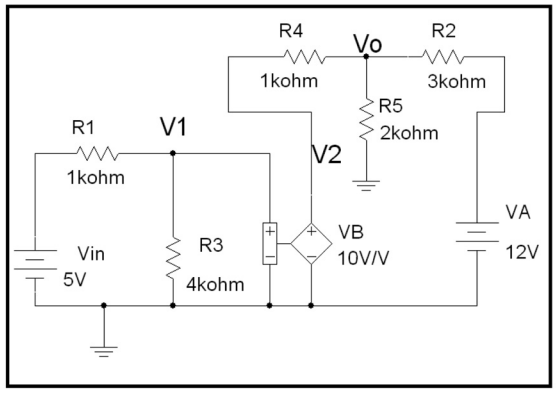
Задача 4.17. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость напряжения на резисторе R1 от I1 при изменении значения I1 от –8 до 16 мА.

Задача 4.18. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость напряжения на резисторе R3 от I1 при изменении значения I1 от –10 до 10 мА.

Задача 4.19. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость мощности, рассеиваемую резистором R1, от I1 при изменении значения I1 от –25 до 25 мА.

Задача 4.20. Для схемы из задачи 4.11 получите зависимость мощности источника тока I1 от I1 при изменении значения I1 от –25 до 25 мА.

Задача 4.21. Для следующей схемы получите зависимость напряжения Vo от Vin при изменении значения Vin от –10 до 15 В:



Задача 4.22. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость напряжения V1 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 15 В.

Задача 4.23. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость напряжения V2 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 25 В.

Задача 4.24. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость суммы напряжений V1 и V2 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 25 В.

Задача 4.25. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость напряжения на резисторе R4 от Vin при изменении значения Vin от 0 до 25 В.

Задача 4.26. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость отношения Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от 0 до 7 В.

Задача 4.27. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость напряжения на резисторе R2 от Vin при изменении значения Vin от –8 до 16 В.

Задача 4.28. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость напряжения на резисторе R3 от Vin при изменении значения Vin от –10 до 10 В.

Задача 4.29. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость тока через резистор R4 от VA при изменении значения VA от –10 до 12 В.

Задача 4.30. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость тока резистора R5 от VA при изменении значения VA от –12 до 10 В.

Задача 4.31. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость мощности, рассеиваемой резистором R1, от Vin при изменении значения Vin в диапазоне от –25 до 25 В.

Задача 4.32. Для схемы из задачи 4.21 получите зависимость мощности источника напряжения Vin от напряжения Vin при изменении значения Vin в диапазоне от –25 до 25 В.

Задача 4.33. Получите ВАХ для диода 1N914. Пользуясь графиком, определите значение прямого падения напряжения диода.

Задача 4.34. Отобразите ВАХ диода 1S1830. Пользуясь графиком, определите значение прямого падения напряжения диода.

Задача 4.35. Получите ВАХ для стабилитрона 1N4740A. Пользуясь графиком, определите напряжение зенеровского пробоя, а также значение прямого падения напряжения диода.

Задача 4.36. Получите ВАХ для стабилитрона 1N4756A. Пользуясь графиком, определите напряжение зенеровского пробоя, а также значение прямого падения напряжения диода.

Задача 4.37. Получите ВАХ для синего светодиода. Пользуясь графиком, определите значение прямого падения напряжения диода.

Задача 4.38. Получите ВАХ для желтого светодиода. Пользуясь графиком, определите значение прямого падения напряжения диода.

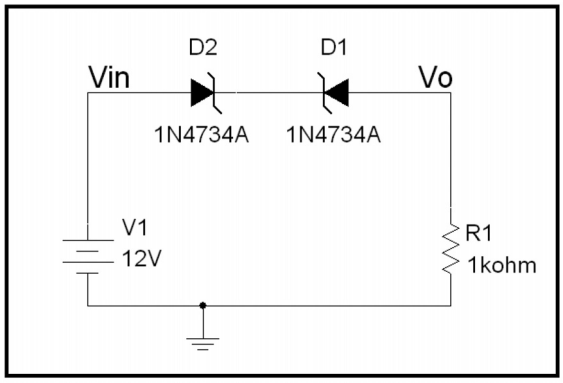
Задача 4.39. Получите ВАХ для резистора 1 кОм.

Задача 4.40. Получите ВАХ для резистора 500 Ом.

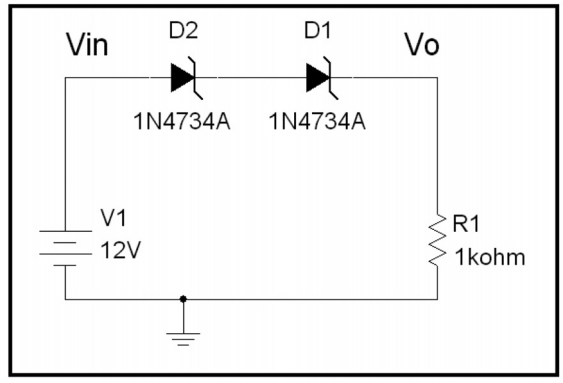
Задача 4.41. Получите ВАХ для резистора 15 Ом.

Задача 4.42. Получите ВАХ для резистора 15 МОм.

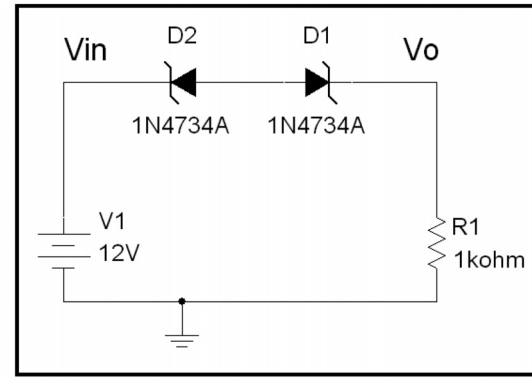
Задача 4.43. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от –20 до 20 В для данной схемы:



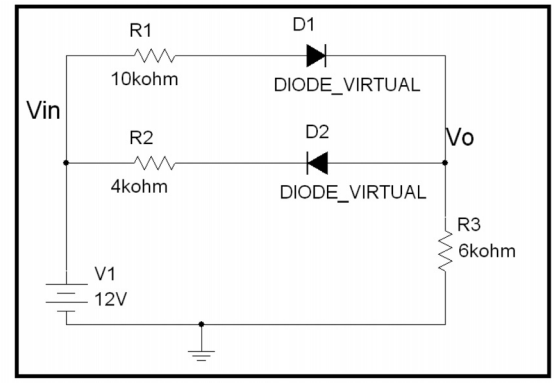
Задача 4.44. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от –20 до 20 В для данной схемы:



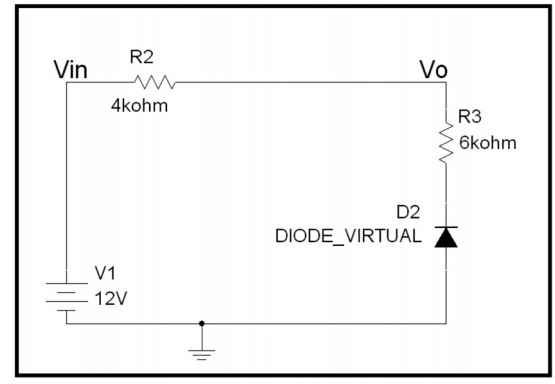
Задача 4.45. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от –20 до 20 В для данной схемы:



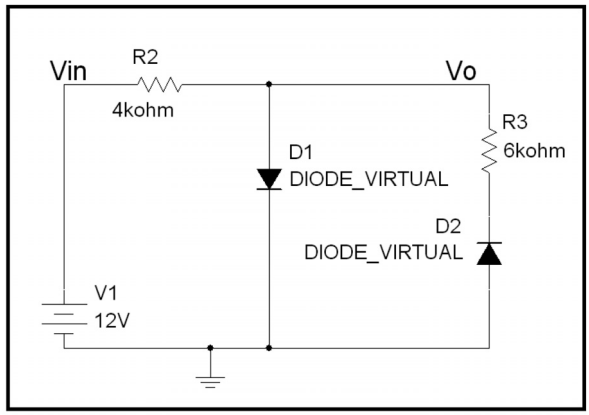
Задача 4.46. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от –20 до 20 В для данной схемы:



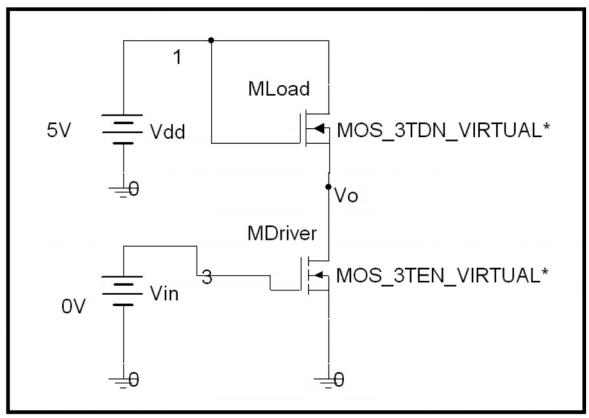
Задача 4.47. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от –20 до 20 В для данной схемы:



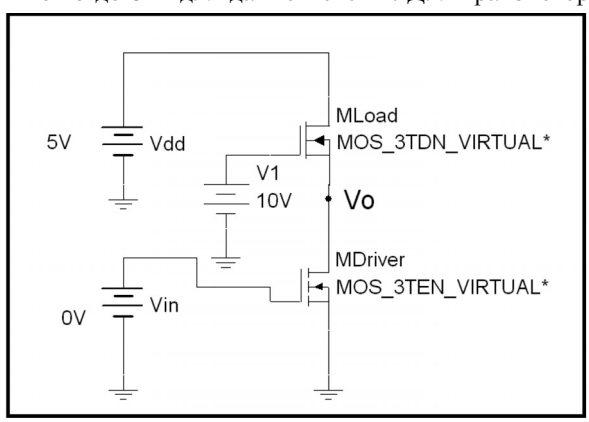
Задача 4.48. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от –20 до 20 В для данной схемы:



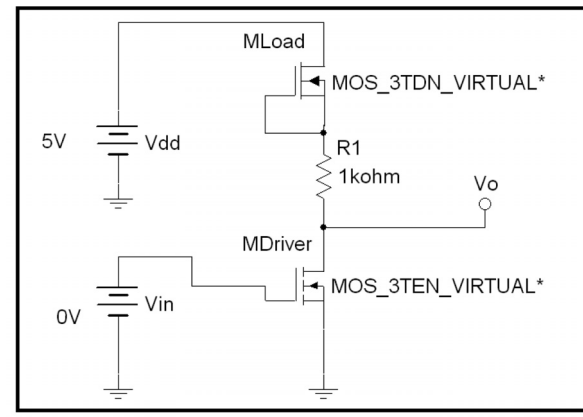
Задача 4.49. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от 0 до 5 В для данной схемы. Для транзистора драйвера используйте значения K_P = 60 мкА/$В^2$ и VTO = 1 В, для нагрузочного транзистора используйте значения K_P = 30 мкА/$В^2$ и VTO = 0,5 В:



Задача 4.50. Получите зависимость передаточного коэффициента Vo/Vin от Vin при изменении значения Vin от 0 до 5 В для данной схемы. Для транзистора драйвера используйте значения K_P= 120 мкА/$В^2$ и VTO = 1 В, для транзистора нагрузки используйте значения K_P=30мкА/$В^2$ и VTO = 0,5 В.



Задача 4.51. Повторите моделирование раздела 4.3.2 для данной схемы. Используйте для MOSFET параметры, которые применялись в примере. Получите зависимость Vo от Vin.



Задача 4.52. Получите ВАХ для транзистора 2N2222A NPN BJT.

Задача 4.53. Получите ВАХ для транзистора 2N4401 NPN BJT.

Задача 4.54. Получите ВАХ для транзистора 2N3906 PNP BJT.

Задача 4.55. Получите ВАХ для транзистора 2N2907A PNP BJT.

Задача 4.56. Получите ВАХ MOSFET при следующих параметрах модели: K_P = 120 мкА/$В^2$, VTO = 1 В, lambda = 0,001 $В^{-1}$.

Задача 4.57. Получите ВАХ MOSFET при следующих параметрах модели: K_P = 120 мкА/$В^2$, VTO = 1 В, lambda = 0,000 $В^{-1}$.

Задача 4.58. Получите ВАХ MOSFET при следующих параметрах модели: K_P = 120 А/$В^2$, VTO = 1 В, lambda = 0,01 $В^{-1}$.

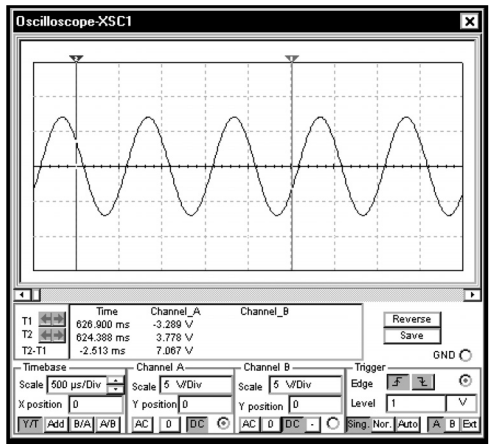
Задача 4.59. Получите ВАХ для вакуумной лампы 6C5.

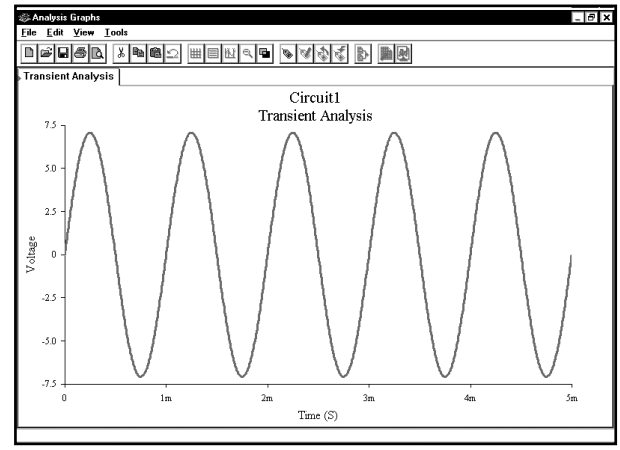
ГЛАВА 5

Анализ модуля и фазы гармонических сигналов

Программа Multisim предлагает ряд инструментов для анализа модулей и фаз гармонических сигналов, таких как вольтметры AC, ваттметры с функцией расчета коэффициента мощности, Боде-плоттеры и анализ Spice AC. Схемы могут анализироваться при одной или нескольких частотах.

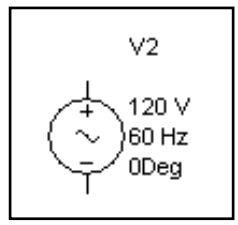
Следует понимать отличие между анализом модулей и фаз гармонических сигналов и моделированием во временной области, о котором будет рассказано в главе 6. Модели, представленные в этой главе, используются для вычисления модуля и фазы напряжений и токов. Моделирование во временной области предназначено для анализа временных диаграмм. Вот примеры диаграмм, созданных с помощью функции **Transient Analysis** и виртуального осциллографа **Oscilloscope:**

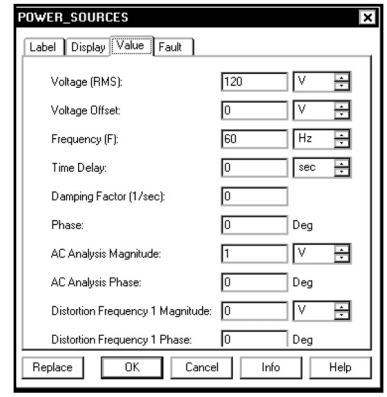




На этих графиках отображена временная диаграмма напряжения; математически ее можно представить как $5\sin(2\pi 1000t + 0^{o})$. Модуль данного напряжения составляет 5 В, а фаза равна 0° (то есть $5\angle 0^{o}$). Все амплитудно-фазовые модели, рассматриваемые в данной главе, будут выдавать для такого напряжения комплексное значение $5\angle 0^{o}$, в то время как анализ во временной области позволяет нам просматривать временные диаграммы, подобные осциллограммам, полученным на реальных осциллографах.

Перед тем как начать, отметим, что можно использовать два источника напряжения AC: **AC Power Voltage Source (Источник напряжения переменного тока)** и **AC Signal Voltage Source (Источник сигнала переменного тока).** На схемах они выглядят одинаково. Вот условное обозначение и окно для задания параметров источника напряжения AC:

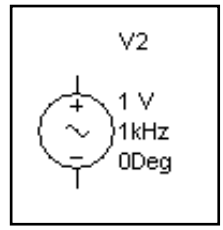


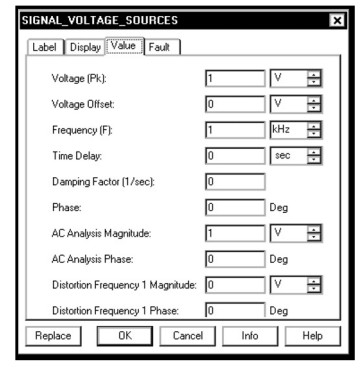


По умолчанию источник напряжения AC имеет действующее значение 120 В и частоту 60 Гц. Устанавливается и используется в качестве модуля комплексного напряжения именно действующее значение (RMS value), хотя на схеме это не отображается[1].

[1] В качестве модуля комплексного напряжения (или тока) может использоваться как действующее значение, так и амплитуда синусоидального напряжения. Поскольку при гармонической форме сигнала отношение амплитуды к действующему значению постоянно и составляет $\sqrt{2}$, это не вызывает особых проблем. Необходимо только знать, в каких величинах выражены токи и напряжения, и все модули выражать либо в действующих, либо в амплитудных значениях (*Прим. ред.*).

Далее покажем источник сигнала AC:





Условное обозначение этого источника отличается от условного обозначения источника напряжения только задаваемыми по умолчанию числовыми значениями. Для источника сигнала амплитуда равна 1 В, а частота составляет 1 Гц. Основное отличие между двумя источниками показано в диалоговом окне с настройками. Для источника сигнала указываются максимальные значения напряжения значения, а для источника напряжения — действующие. Это различие не отображено на схеме, поэтому только по информации, представленной на схеме нельзя определить, с каким источником вы работаете.

Во время редактирования схемы определить тип источника нетрудно, так как можно дважды щелкнуть по нему и открыть диалоговое окно, содержащее действующие или максимальные значения. Но при чтении этой книги вы пользуетесь только рисунками и схемами, поэтому во все схемы добавлены пояснительные надписи «RMS» (действующее значение) или «Peak» (максимальное значение или амплитуда).

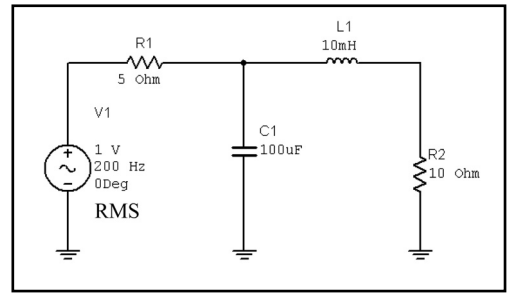
5.1. Измерение модуля и фазы при одной частоте

Программа Multisim предлагает два способа измерения переменных токов и напряжений. Для измерения модуля при одной частоте можно использовать функцию **Multimeter**, а также индикаторы тока и напряжения. С помощью этих инструментов возможно измерить ток и напряжение, но не фазу. Инструмент **AC Analysis** обладает более широкими возможностями. Используя его, можно получить амплитуду и фазу тока и напряжения при различных частотах, а также отобразить результаты графически или в виде текста.

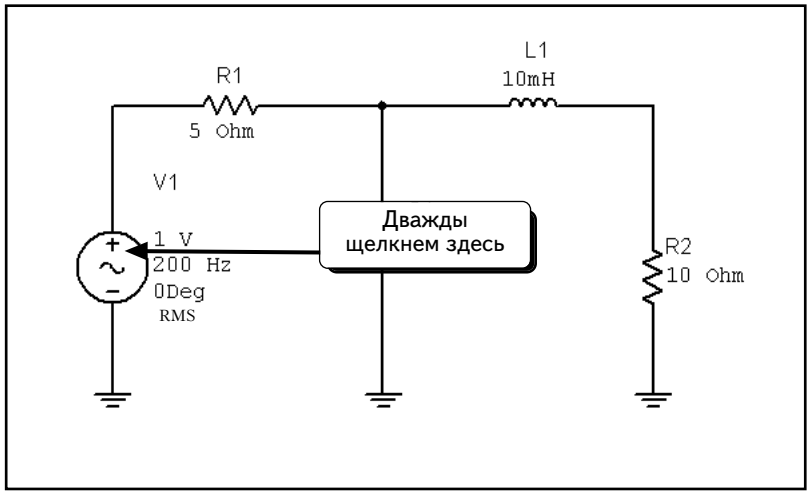
5.1.1. Измерение модуля с помощью приборов

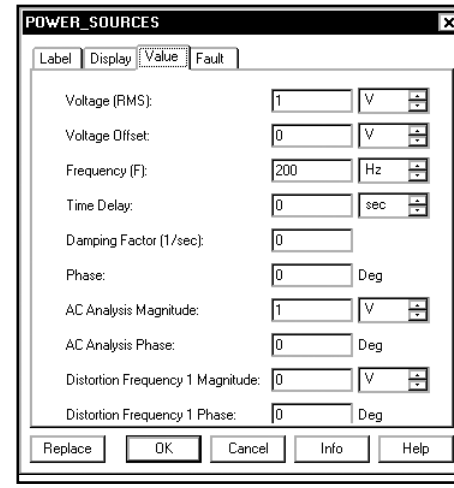
Индикаторы напряжения и тока и мультиметр, имеющиеся в программе Multisim, позволяют измерять действующие значения напряжений при одной частоте. Будем использовать индикаторы так же, как в разделе 3.1, настроив их на измерения на переменном токе (AC). Если ваш прибор настроен на режим постоянно тока (DC), при измерении переменных сигналов AC он будет показывать значение, равное или близкое к нулю. Как указывалось в главе 3, посвященной измерению постоянного тока, индикатор тока имеет небольшое последовательное внутреннее сопротивление, а индикатор напряжения — большое параллельное внутреннее сопротивление. Об этом следует помнить, так как данные параметры могут повлиять на результаты моделирования. В отличие от настоящих вольтметров AC измерительные приборы в программе Multisim не имеют верхнего предела по частоте. В ходе тестов мы выяснили, что индикаторы обеспечивают точные вычисления в диапазоне от 20 до 10^{12} Гц. Таким образом, они являются идеальными измерительными приборами (если не учитывать последовательное и параллельное сопротивления). Единственное ограничение приборов программы Multisim состоит в том, что мы можем измерять только модули напряжений и токов. При работе со схемами переменного тока этой информации недостаточно. Чтобы определить фазу напряжения или тока, придется использовать функцию SPICE **AC Analysis**.

Начнем измерение амплитуды напряжения и тока со схемы, показанной ниже:



Для источника напряжения на схеме показано значение **1 В**. Это действующее значение напряжения источника. Мы увидим, что индикаторы измеряют действующие значения напряжений и токов. Помните, что действующее значение определяется путем деления максимального значения на квадратный корень из двух: $V_{RMS} = V_{peak}/\sqrt{2}$. При установке значения для источника также задаем действующие значения. Чтобы просмотреть настройки источника, дважды щелкнем по его иконке:

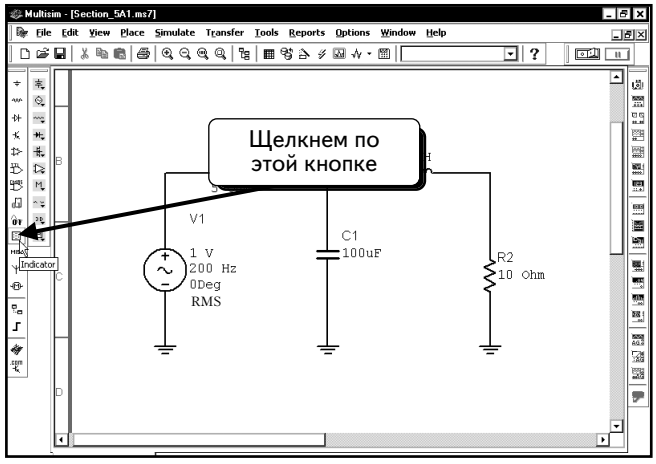


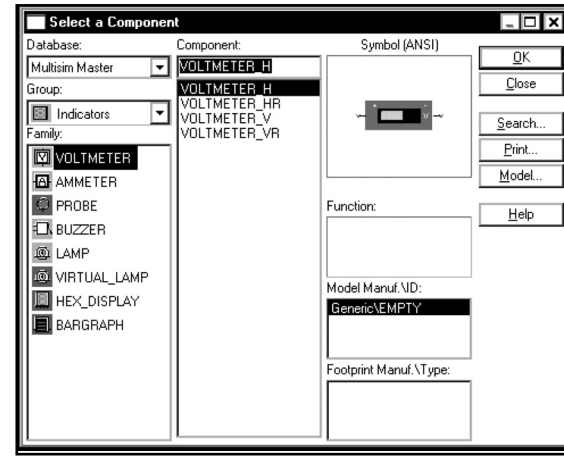


Для данного источника выбраны действующее значение **1 В**, частота **200 Hz (200 Гц)** и фаза **0°**. Внесем соответствующие изменения в ваше диалоговое окно и нажмем кнопку **OK**, чтобы закрыть его.

Включим в схему индикаторы. В качестве примера измерим напряжения на двух узлах и ток через катушку **L1**. Предварительно советуем еще раз просмотреть раздел 3.1, в котором говорится об использовании индикаторов для измерения постоянного тока. В схемах переменного тока индикаторы используются аналогичным образом.

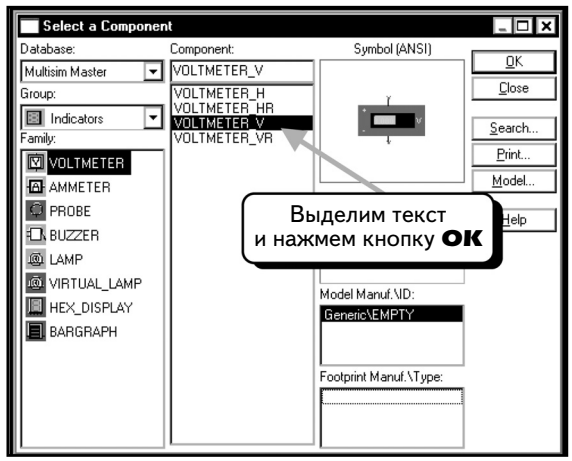
Чтобы добавить индикатор, щелкнем по кнопке **Indicator (Индикатор)** , как показано ниже:

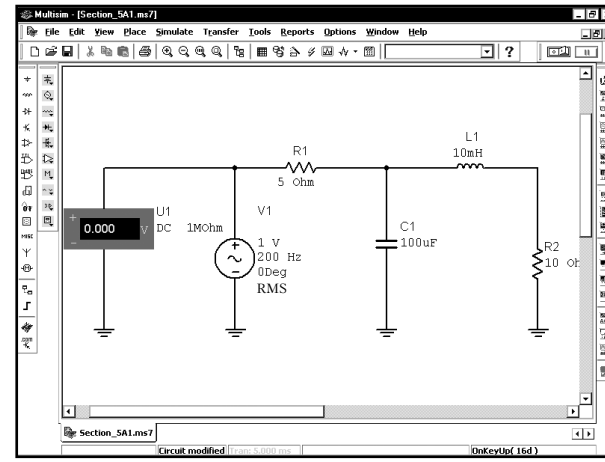




Все индикаторы имеют одинаковые функции. Отличие заключается только в расположении полюсов. Выберем компонент **Voltmeter_V** и нажмем кнопку **OK**.

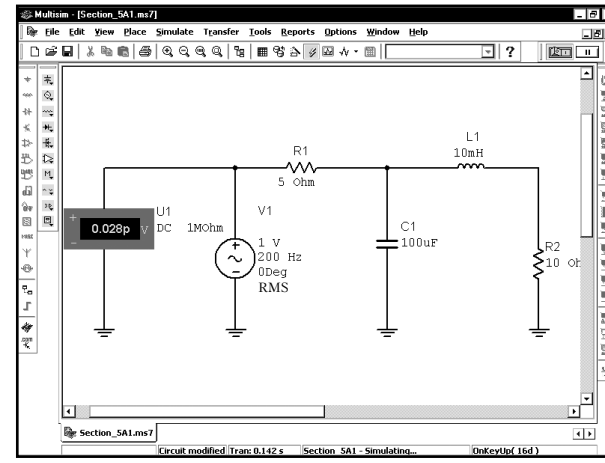
Поместим вольтметр в схему и подключим его так, как показано ниже:





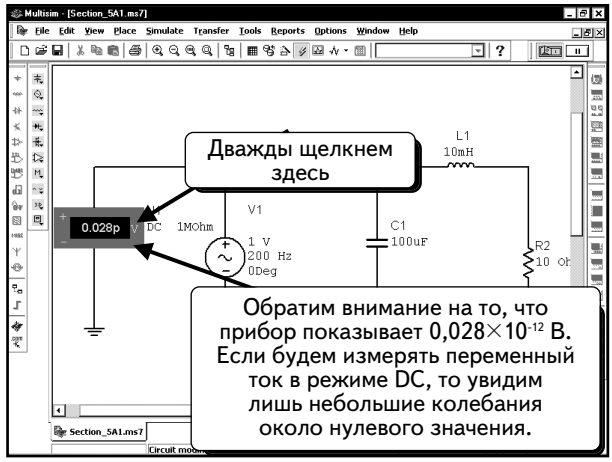
Перед тем как включать в схему другие индикаторы, посмотрим, как работает вольтметр. Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы начать моделирование:

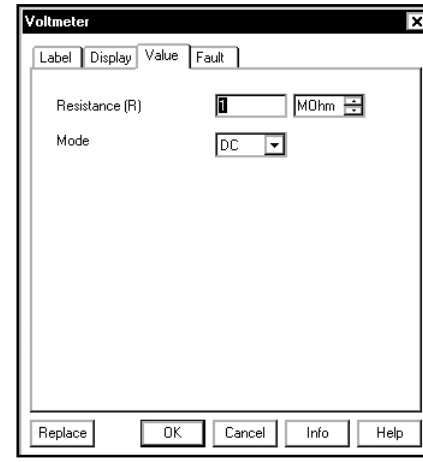




Его показания будут слегка изменяться, но большую часть времени он показывает 0. Причина в том, что по умолчанию индикатор настроен на постоянный ток. Значение постоянной составляющей тока для данного источника нулевое, следовательно, индикатор показывает правильное значение. Остановим моделирование с помощью той же кнопки **Run/stop simulation** .

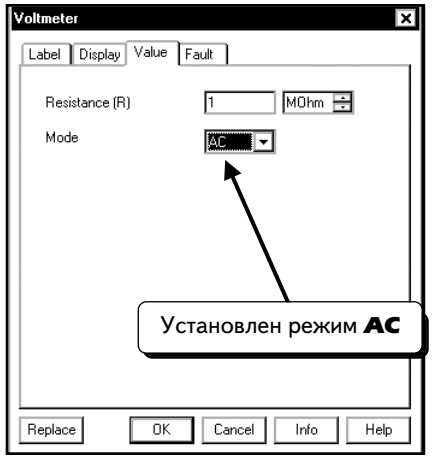
Чтобы изменить параметры индикатора, дважды щелкнем по нему:

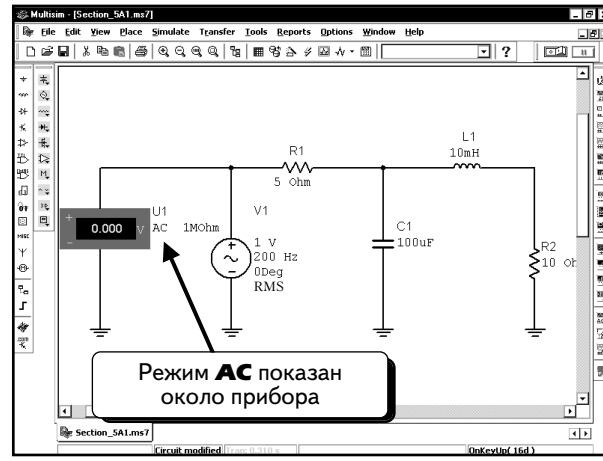




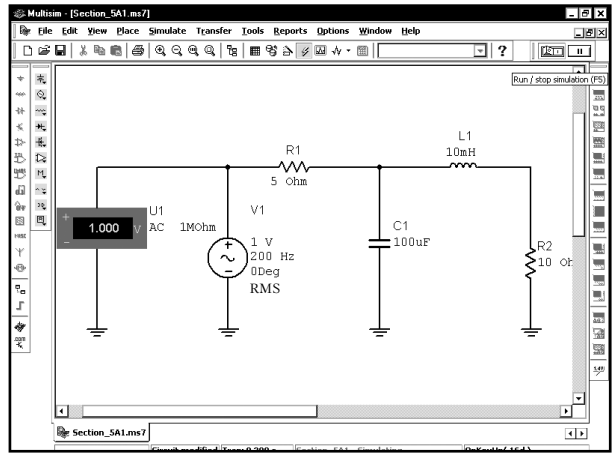
Как видим, индикатор настроен на **DC Mode (Режим постоянного тока)**.

Выберем **AC Mode (Режим переменного тока)** и нажмем кнопку **OK**:



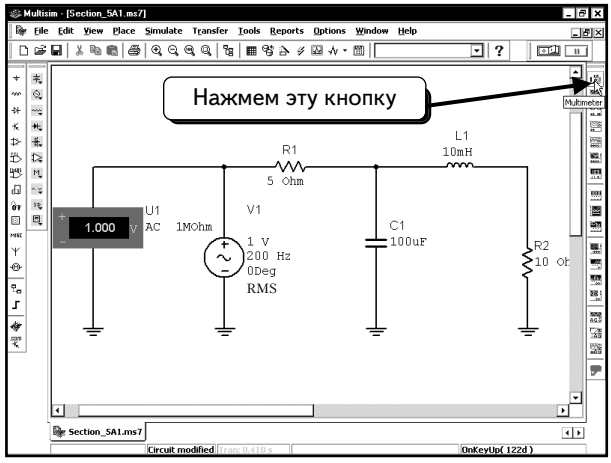


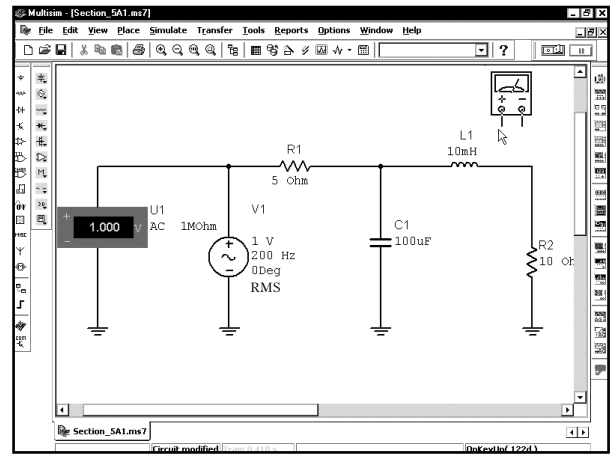
Заметим, что режим индикатора отображается и на схеме. Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы начать моделирование. Через несколько секунд индикатор покажет действующее значение напряжения:



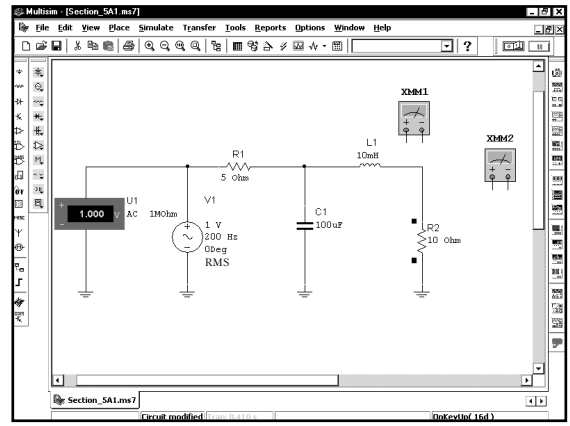
Индикатор показывает значение 1,000 В (это действующее значение напряжения источника). Если просто выполнить измерение с помощью индикатора тока и функции Multimeter, то можно увидеть, что все индикаторы показывают действующие, а не максимальные значения напряжения и тока. Остановим моделирование с помощью кнопки **Run/stop simulation** .

Далее измерим ток через катушку индуктивности **L1** и напряжение на резисторе **R2** с помощью мультиметров. Чтобы включить в схему мультиметр, щелкнем по иконке **Multimeter (Мультиметр)**  на панели инструментов **(Instruments)**:

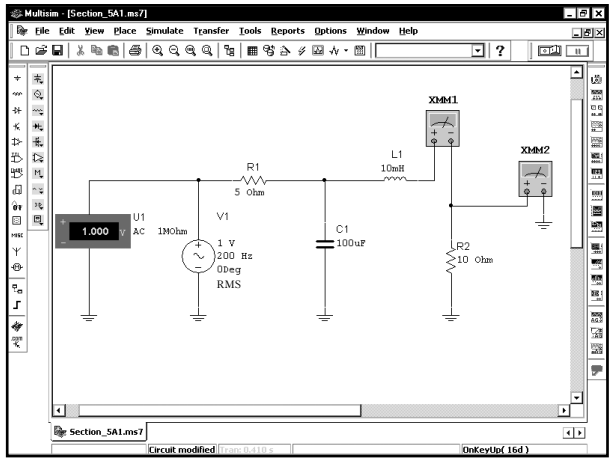


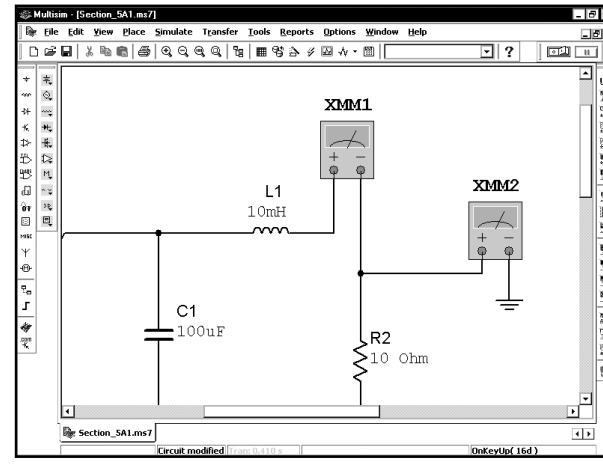


Добавим в схему два мультиметра, как показано ниже:

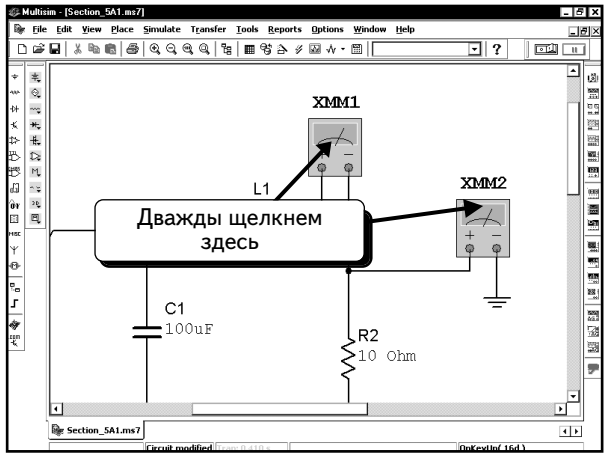


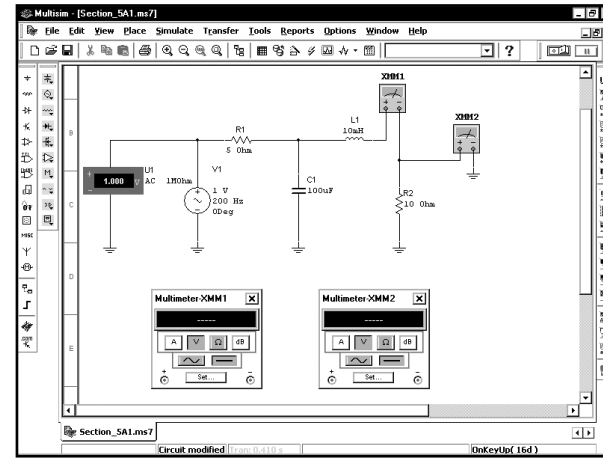
Используем мультиметр **XMM2** для измерения напряжения на резисторе **R2**, а также мультиметр **XMM1** — для измерения тока компонента **L1**. Подключим мультиметры так, как показано ниже:





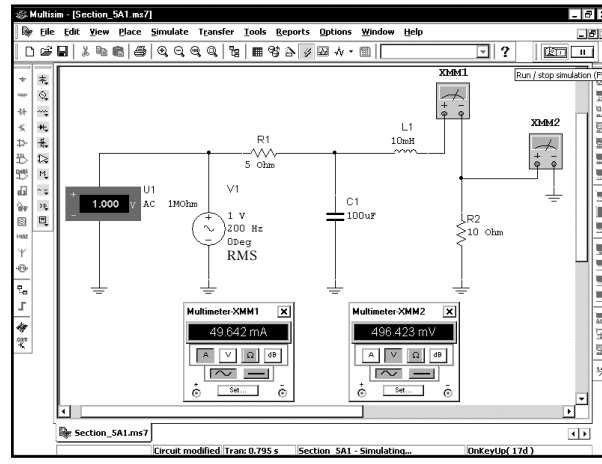
Чтобы увидеть результаты измерений, необходимо дважды щелкнуть по индикаторам и открыть диалоговые окна. Расположим окна, как показано ниже:





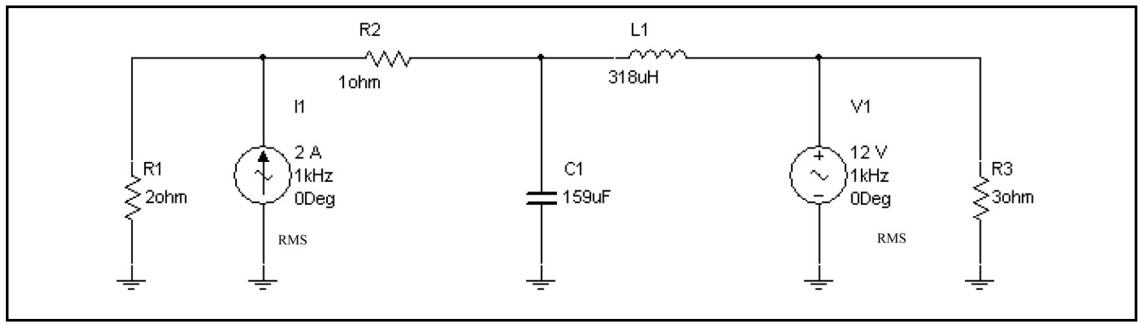
Теперь необходимо настроить оба мультиметра на режим переменного тока, а также задать для мультиметра **XMM1** режим измерения тока, а для мультиметра **XMM2** — режим измерения напряжения. На мультиметре **XMM1** нажмем кнопки ~ и A, а на мультиметре **XMM2** — кнопки ~ и V. Затем начнем моделирование, нажав на кнопку **Run/stop simulation**.

Через некоторое время индикаторы покажут измеренные значения:

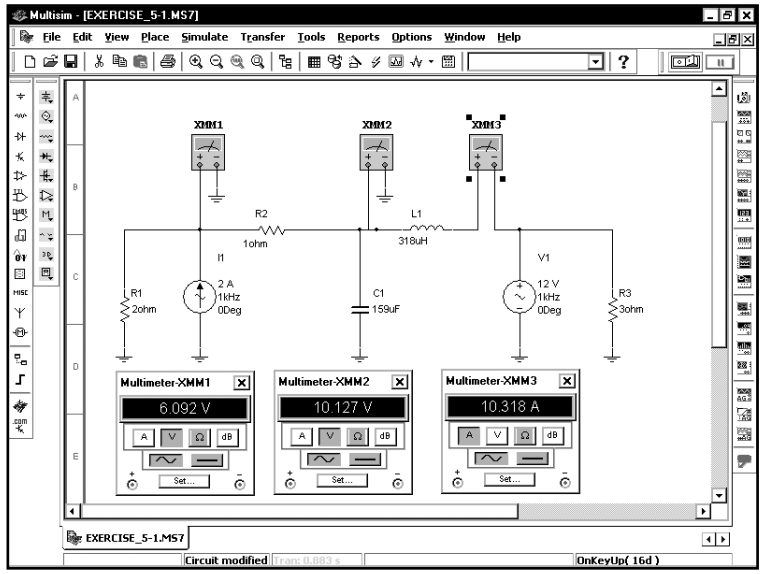


Как видим, напряжение на резисторе R2 равно 496 мВ, а ток через катушку L1 составляет 49,6 мА. С помощью данного метода можно определить модули напряжения и тока любого компонента в схеме. Помните, что все значения являются действующими. Входное напряжение составляет 1 В. Если нужны максимальные значения, умножьте действующие значения на квадратный корень из двух.

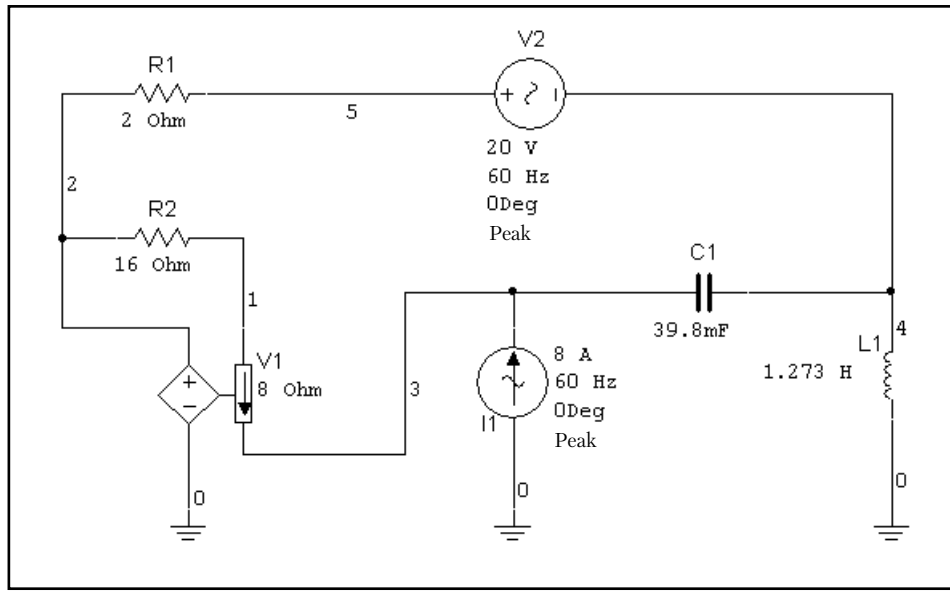
УПРАЖНЕНИЕ 5-1: Определите действующие значения напряжений на узлах 1 и 2, а также действующее значение тока через катушку L1 при частоте 1 кГц:



РЕШЕНИЕ: Включите в схему три мультиметра или индикатора и выполните моделирование:

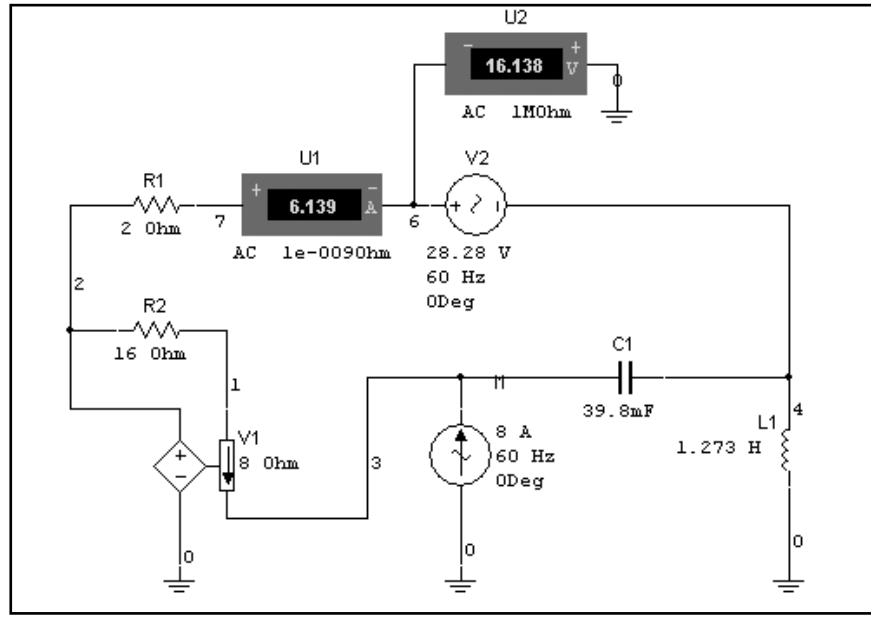


УПРАЖНЕНИЕ 5-2: Определите действующее значение напряжения на узле 5, а также ток резистора **R1** при частоте 60 Гц:



ПОДСКАЗКА: Источник напряжения **V1** является источником напряжения, управляемым током. Напряжение источника **V1** в **8** раз превышает ток через резистор **R2**.

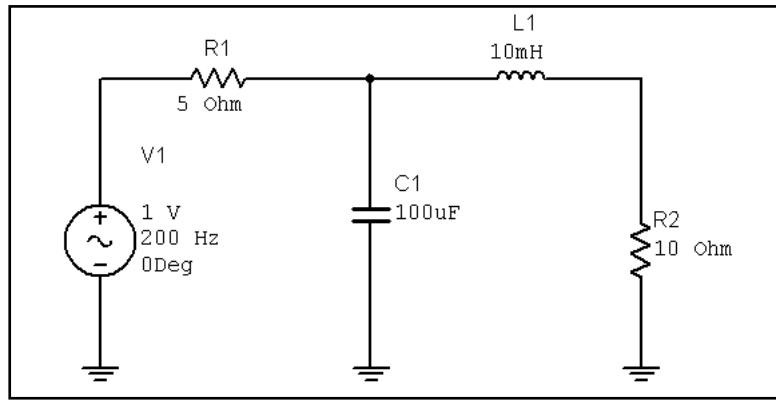
РЕШЕНИЕ: Добавьте мультиметры либо индикаторы напряжения и тока. Обратите внимание: при добавлении в схему индикатора тока узел **5** на верхней схеме был переименован в узел **6** на нижней схеме:



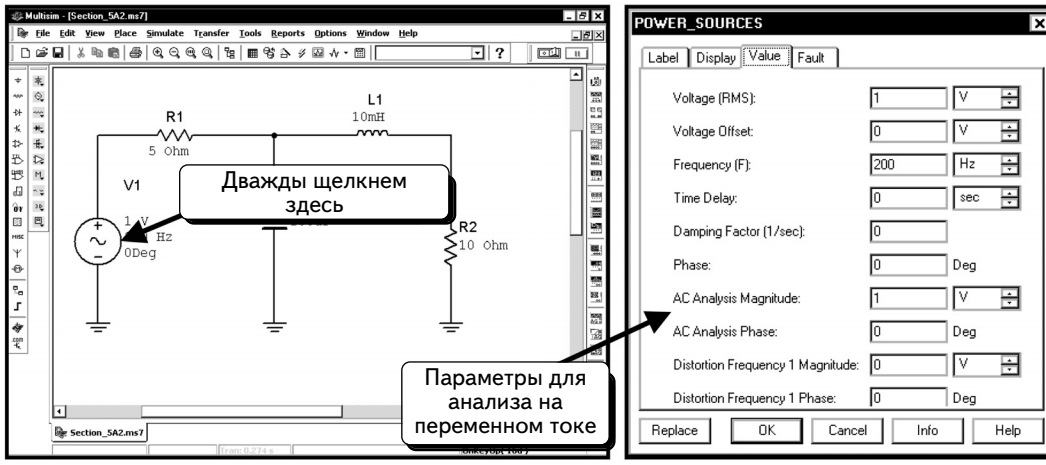
5.1.2. Измерение модуля и фазы с помощью функции AC Analysis

Теперь воспользуемся функцией SPICE **AC Analysis**, повторив действия, которые выполняли в разделе 5.1.1, но рассчитаем, кроме модуля, еще и фазу. В этом разделе будем работать с программой Postprocessor. Методика работы с функциями Postprocessor и Grapher, описана в главе 2.

Сначала создадим схему, которая показана ниже:

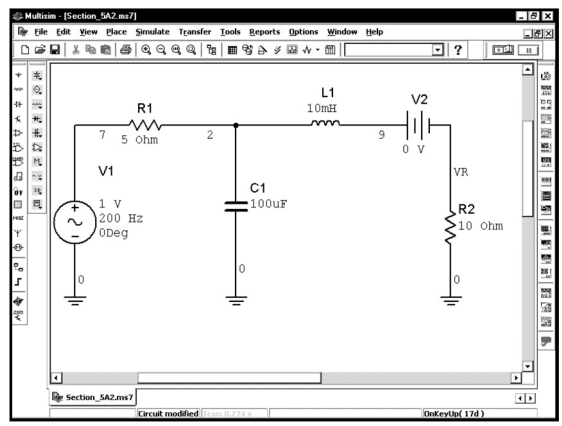


Чтобы воспользоваться функцией AC Analysis, нужно указать параметры источника V1, которые будут изменяться. Данные источника V1, которые показаны на экране, используются только при работе с инструментами виртуальной лаборатории. При работе с функцией AC Analysis необходимо применять другую группу данных. Дважды щелкнем по иконке источника V1:



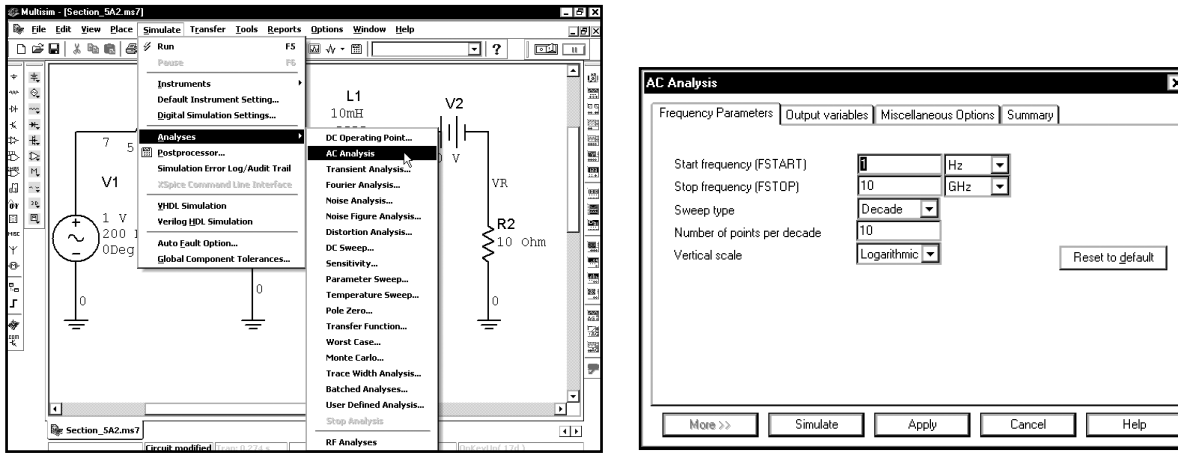
Последние четыре параметра в диалоговом окне используются для анализов Spice. Модуль напряжения источника должен равняться 1 В, а фаза — 0°. Модуль напряжения источника может интерпретироваться как действующее или максимальное значение. Если мы интерпретируем модуль как действующее значение, то все значения напряжений и токов будут действующими. Если мы интерпретируем амплитуду как максимальное значение, то все модули напряжений и токов будут максимальными значениями. В предыдущем примере были использованы действующие значения, поэтому интерпретируем амплитуду 1 В как действующее значение. Все параметры в диалоговом окне настроены правильно; нажмем кнопку **OK**, чтобы вернуться к схеме.

Измерим ток через катушку **L1** и напряжение на резисторе **R2**. Чтобы измерить ток, добавим источник напряжения 0 В и отобразим ток через него (см. раздел 4.1). Подключим источник так, как показано ниже:

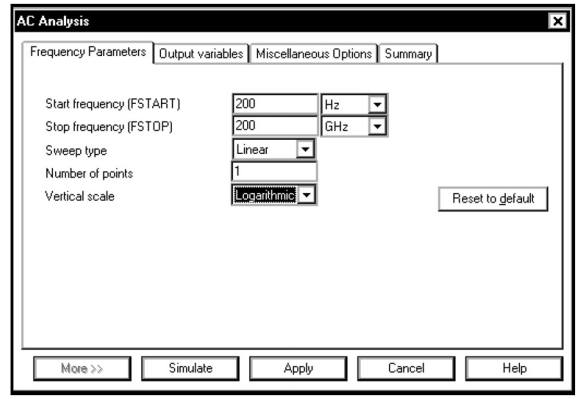


Включим опцию, которая отображает названия узлов, в этом случае легко следить за обозначениями напряжений на узлах схемы. Напряжение на резисторе — это напряжение узла **VR** относительно заземления. Чтобы переименовать узел, дважды щелкнем по соответствующему проводу.

Теперь можно настроить функцию **AC Analysis**. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Analyses ⇒ AC Analysis**:

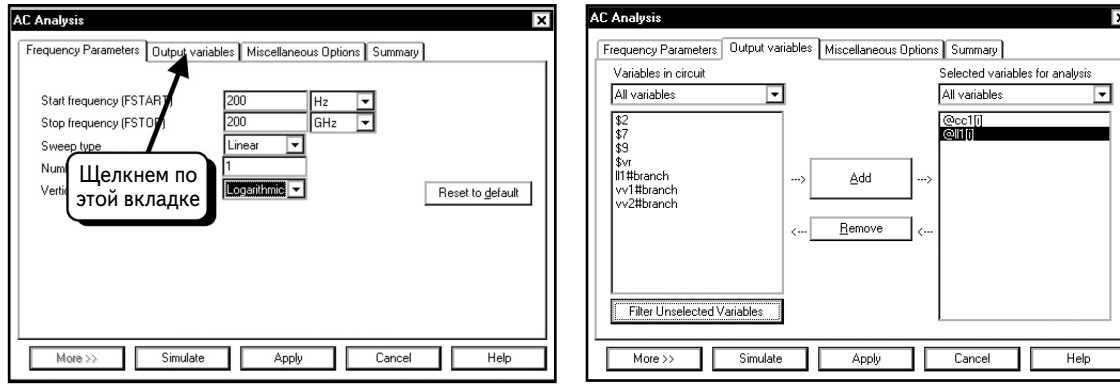


Будем анализировать схему при одном значении частоты (200 Гц). Введем в диалоговом окне данные, как показано ниже:



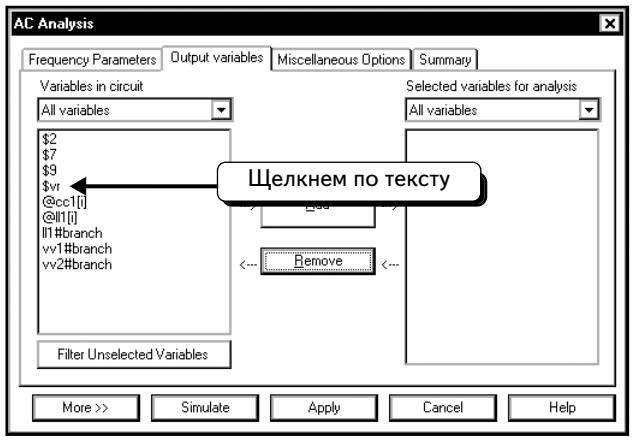
Мы выбрали тип анализа ***Linear Sweep* (Линейная вариация)**, а также настроили опцию ***Number of Points* (Количество точек)** на 1. Опции ***Start Frequency* (Начальная частота)** и ***Stop Frequency* (Частота остановки)** равны 200 Гц. Таким образом, в диалоговом окне используется одна частота: ***200 Гц***. Не будем указывать значение для опции ***Vertical Scale* (Вертикальный масштаб)**, так как нет необходимости в графическом представлении результатов.

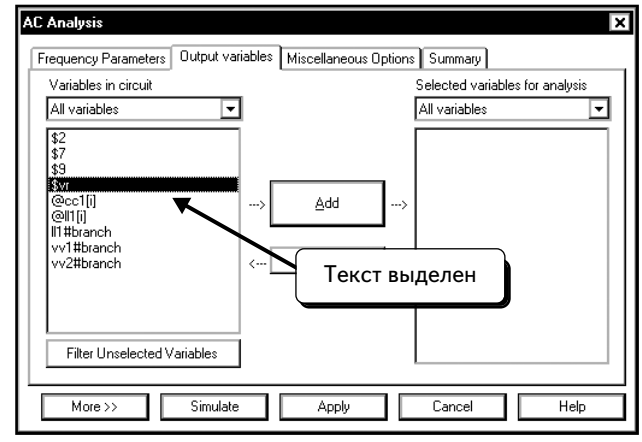
Укажем выходные переменные. Щелкнем по вкладке ***Output Variables***:



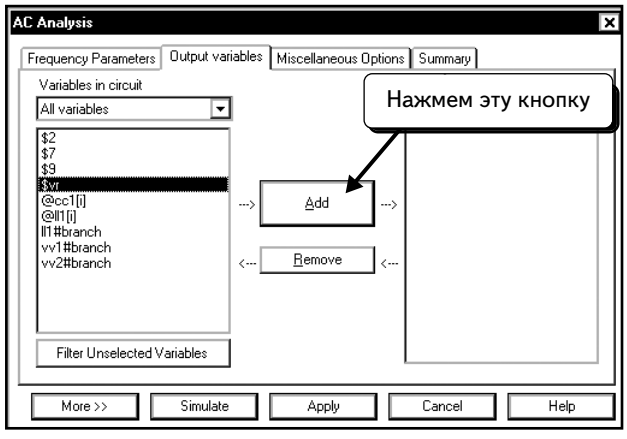
В данном диалоговом окне выбраны две переменные, но они нам не нужны. Удалим их и будем работать с напряжением узла VR и током через катушку L1.

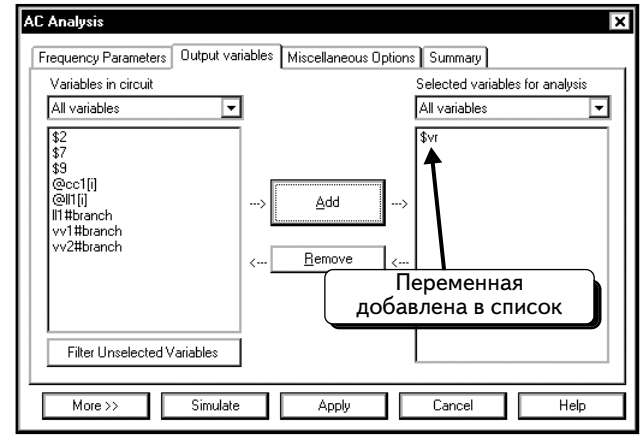
Щелкнем по переменной **$vr**, чтобы выбрать ее:



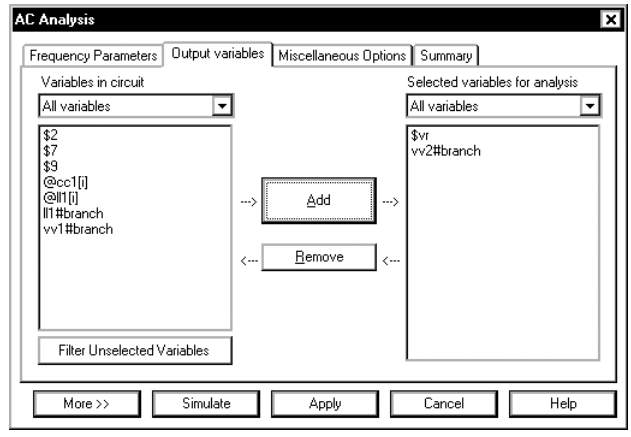


Нажмем кнопку **Add**:

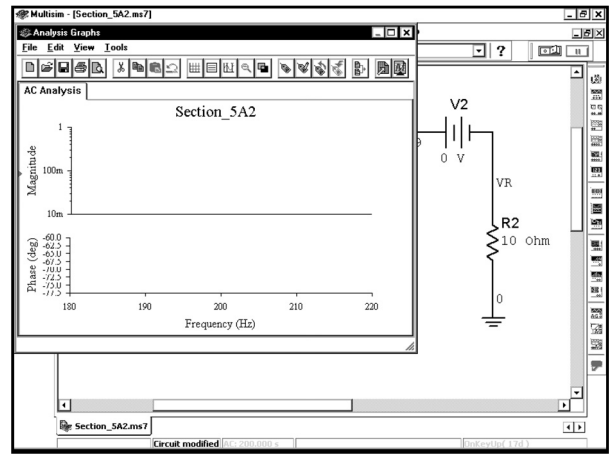




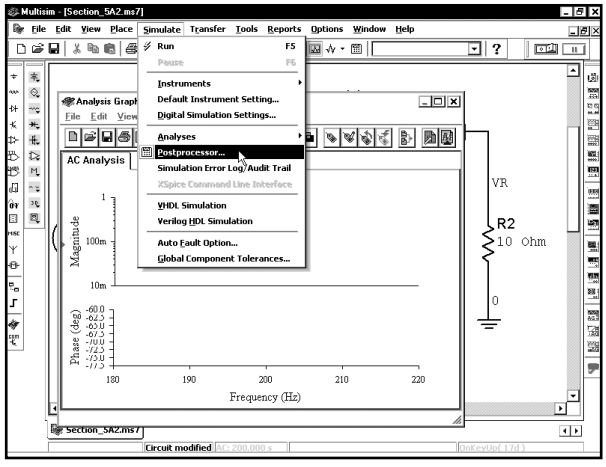
Теперь в результатах моделирования будет получено напряжение узла **vr**, следовательно, данные станут доступны для программы Postprocessor. Повторим процедуру и добавим в список переменную **vv2#branch** (ток источника V2), который является также током через катушку L1:

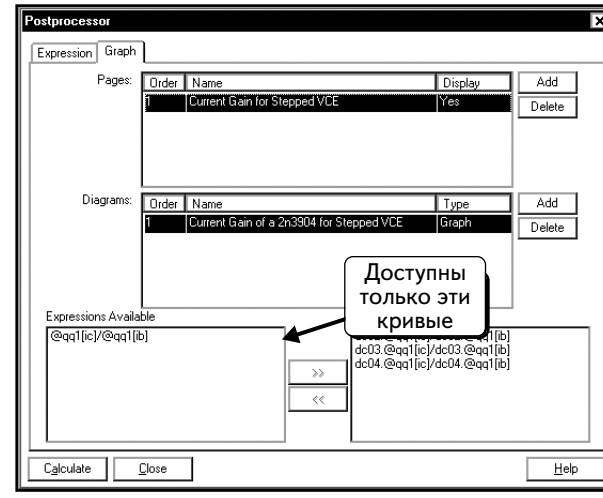


Теперь нажмем кнопку **Simulate**, чтобы начать моделирование:

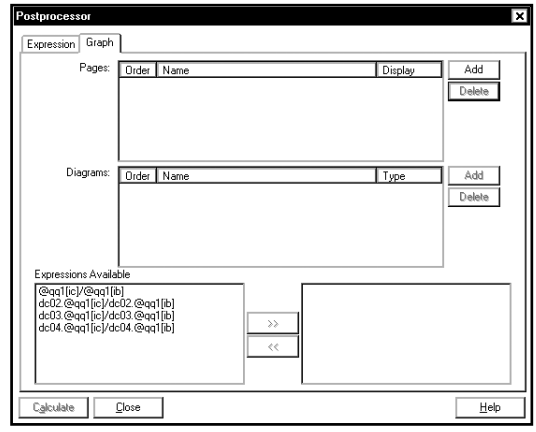


График, который отобразится по умолчанию, не слишком полезен, так как результат содержит только одну точку. Чтобы просмотреть результаты, нужно использовать программу Postprocessor. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Postprocessor**:



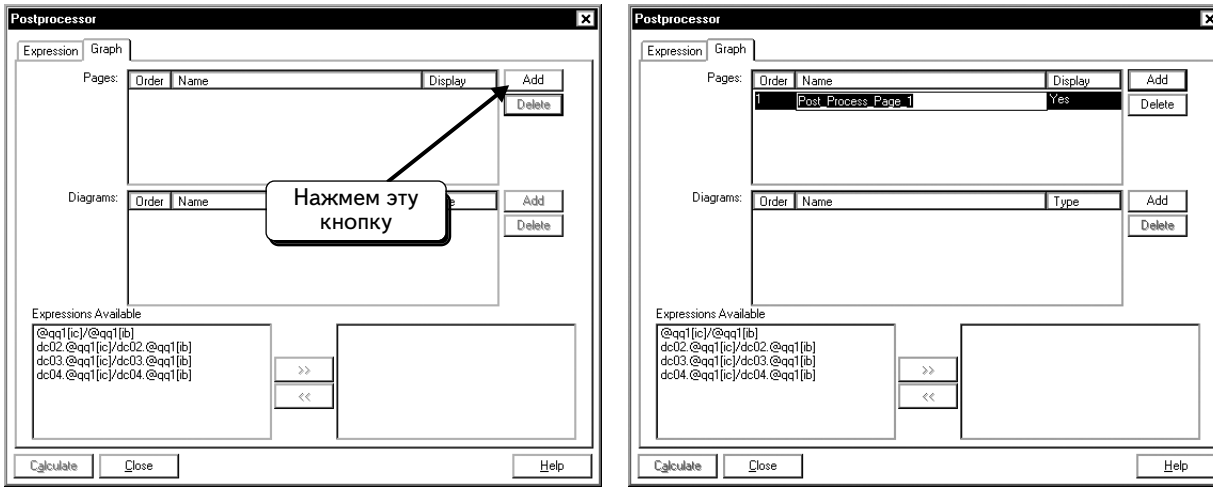


Окно Postprocessor содержит страницы и графики предыдущих моделей. Удалим все старые страницы и графики:

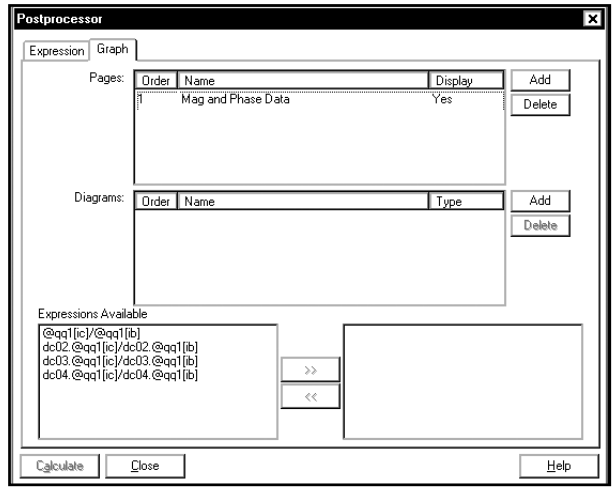


Чтобы отобразить данные в виде текста, необходимо создать новую страницу и добавить в нее таблицу.

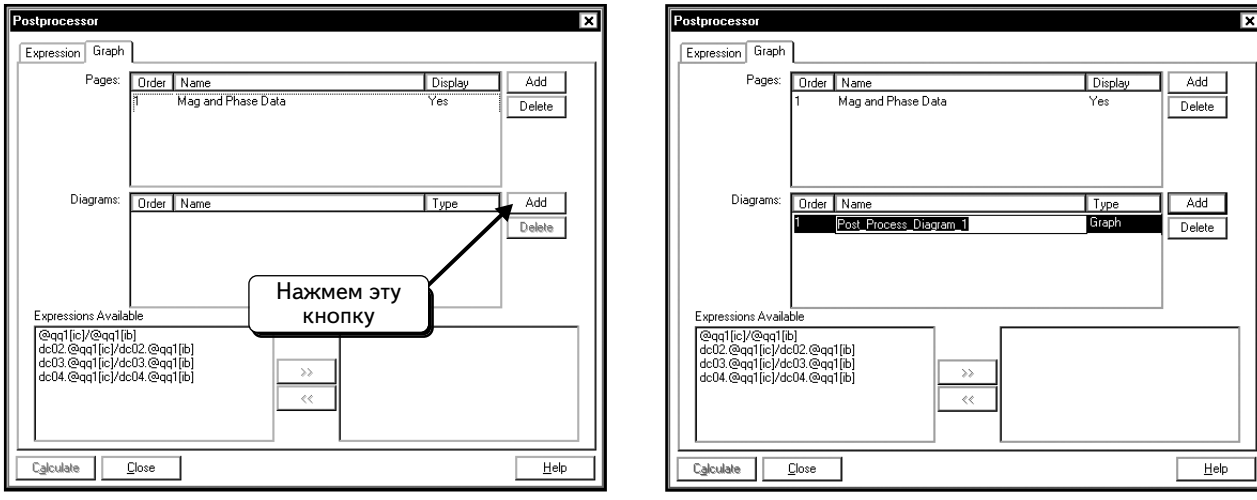
Нажмем кнопку **Add**, чтобы создать новую страницу:



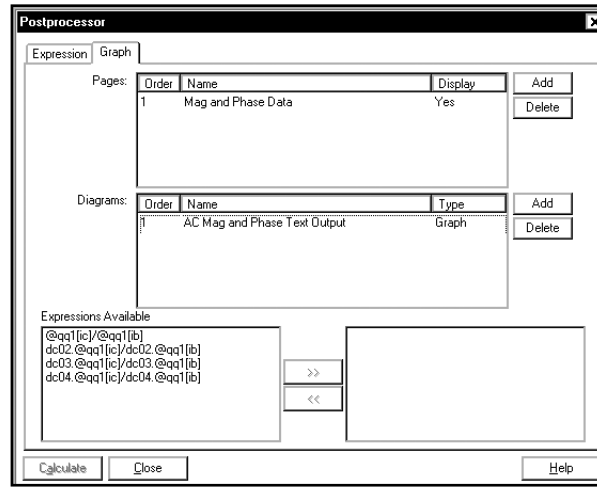
Введем название для новой страницы, например **«Mag and Phase Data»**:



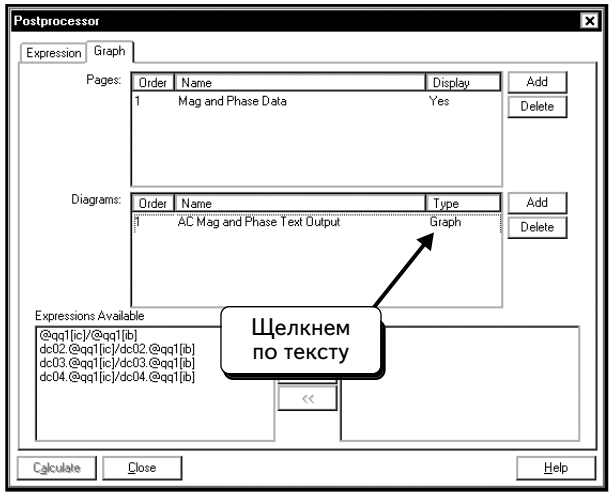
Далее нажмем нижнюю кнопку **Add**, чтобы создать новую диаграмму на странице Postprocessor:

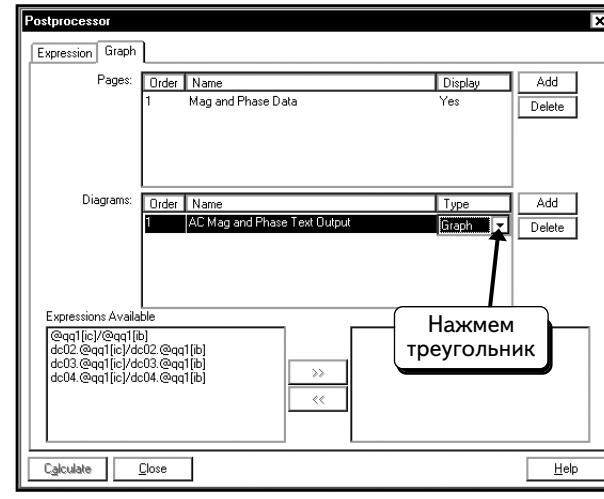


Введем название диаграммы, например **«AC Mag and Phase Text Output»**:

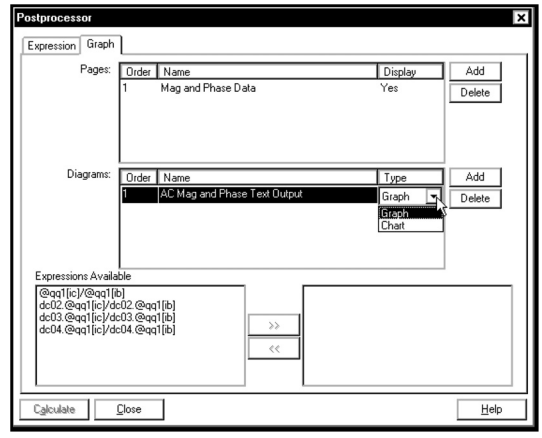


Последнее, что осталось сделать, — это задать табличную форму вывода результатов. Щелкнем по вкладке **Graph** и выберем опцию **Diagram Type (Тип диаграммы)**. Появится символ в виде треугольника ▼:





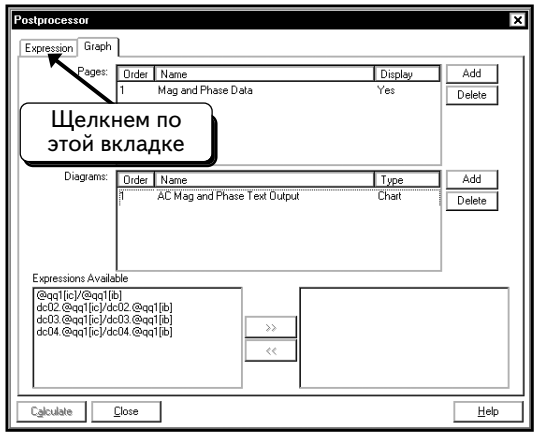
Щелкнем по этому символу ▼, чтобы просмотреть список доступных типов диаграмм:

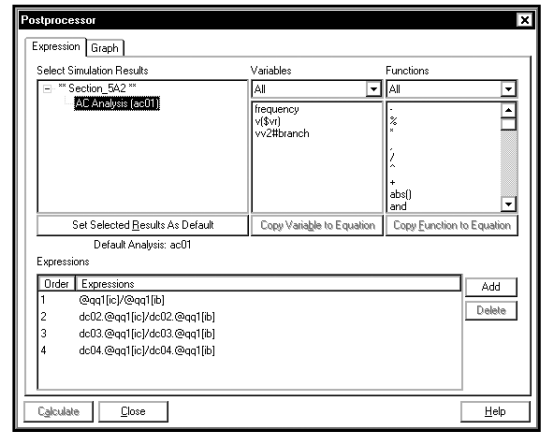


Выберем **Chart (Таблица)**.

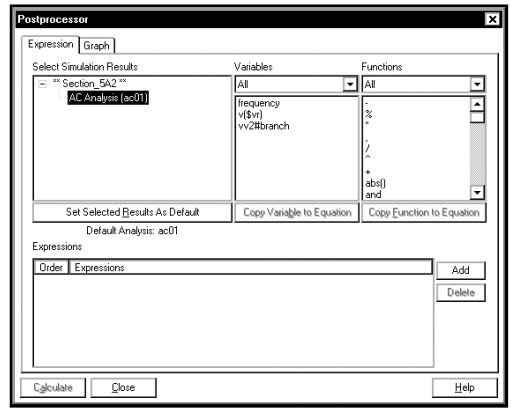
Далее укажем, какие данные должны отобразиться в таблице, а также создадим соответствующие выражения.

Щелкнем по вкладке **Expression**:

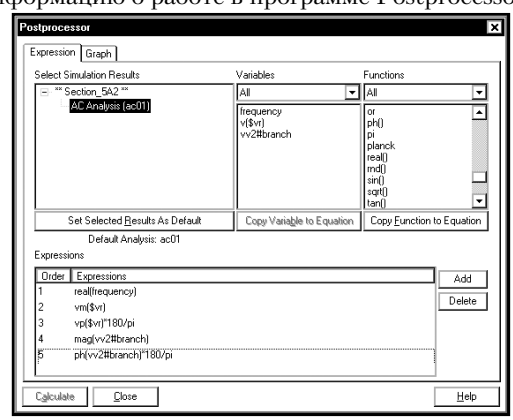




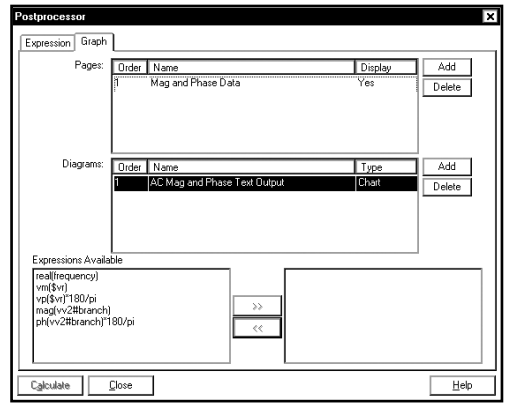
В этом диалоговом окне показан список выражений из предыдущих сеансов моделирования. Удалим их, выделив каждое и нажав кнопку ***Delete***:



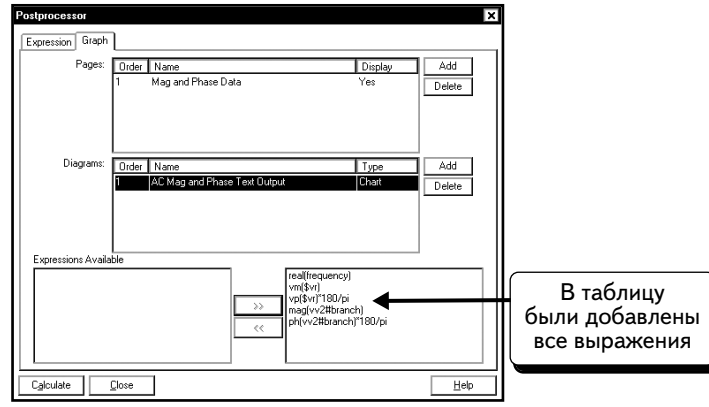
Как видим, нам были доступны только три параметра: частота, напряжение на узле VR и ток источника V2. Эти данные были выбраны во время начальной настройки модели. Создадим следующие выражения: **`real(frequency)`**, **`vm($vr)`**, **`vp($vr)*180/pi`**, **`mag(vv2#branch)`** и **`ph(vv2#branch)*180/pi`**. По умолчанию программа Multisim отображает данные в виде комплексных чисел с действительными и мнимыми частями (real and imaginary parts). Чтобы отобразить частоту в виде числа, используем действительную часть комплексного значения. При любом моделировании мнимая часть для частоты равна нулю. Чтобы сэкономить пространство, значение частоты было настроено на отображение только действительной части. **vm($vr)** — модуль напряжения на узле ***VR***, **`vp($vr)*180/pi`** — фаза напряжения на узле ***VR***. По умолчанию программа Multisim возвращает угол в радианах, поэтому выполним преобразование в градусы, умножив значение на $180/\pi$. Выражение **`mag(vv2#branch)`** — модуль тока источника **v2** или модуль тока через катушку индуктивности L1, **`ph(vv2#branch)*180/pi`** — фаза тока источника **v2**. Чтобы добавить выражение, нажмем кнопку ***Add***, а потом введем выражение вручную, либо нажмем кнопку ***Copy Variable to Expression*** или ***Copy Function to Equation*** (Дополнительную информацию о работе в программе Postprocessor можно найти в разделе 2.3):



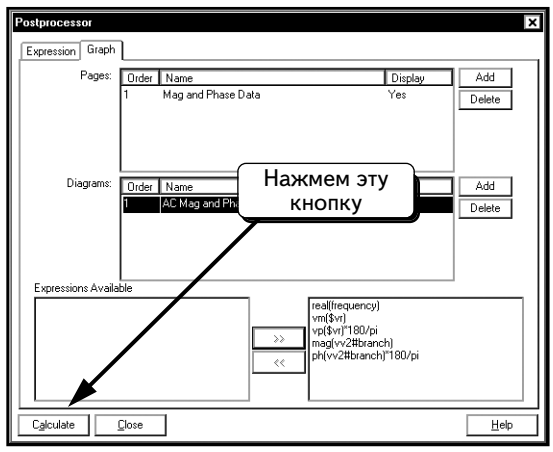
Щелкнем по вкладке **Graph** :

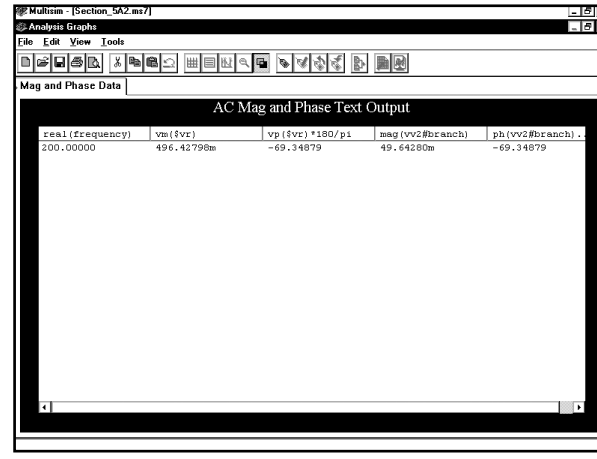


Добавим в таблицу все выражения :



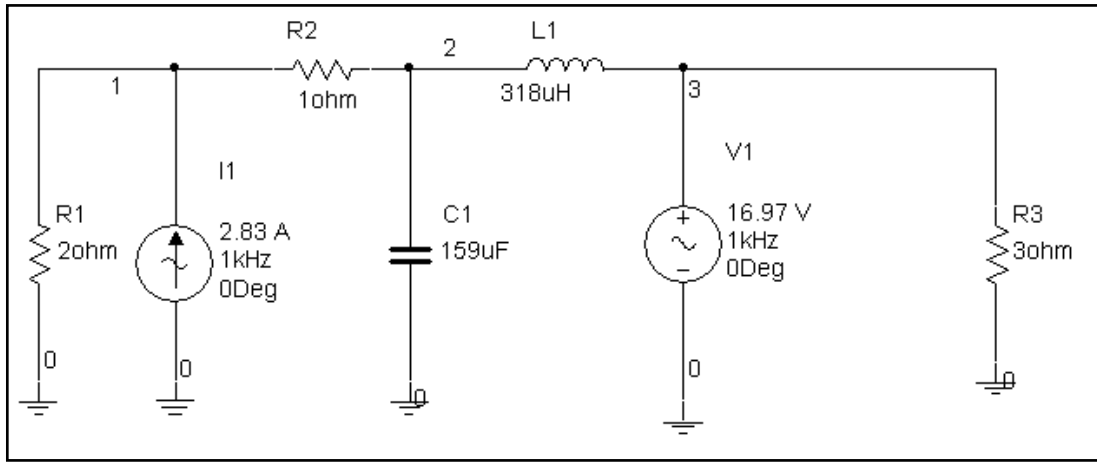
Нажмем кнопку **Calculate**, чтобы создать таблицу :



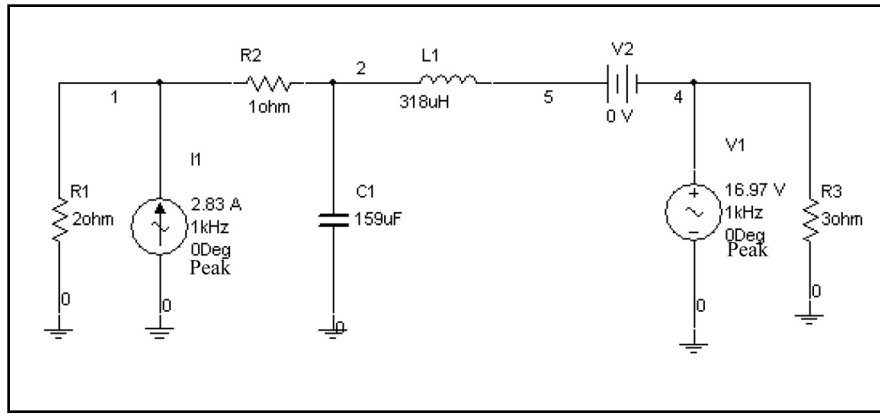


Результаты показывают, что модуль напряжения на узле **vr** составляет **496** мВ, а фазовый угол равен **–69,35**° (комплексное напряжение записывается в виде 0,496∠ –69,35° В). Ток через катушку L1 составляет **49,6** мА, а фазовый угол равен **–69,35**° (0,0496∠ –69,35° А).

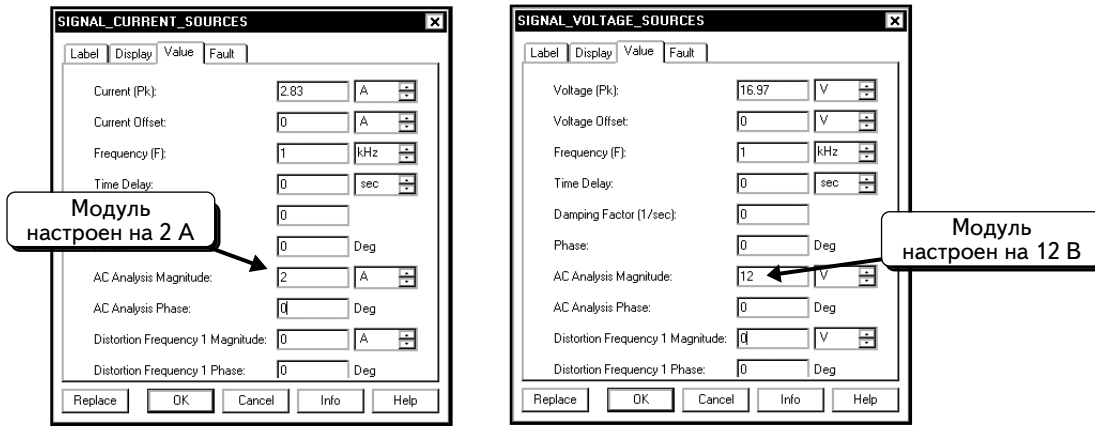
УПРАЖНЕНИЕ 5-3: С помощью функции **AC Analysis** определите модуль и фазу напряжений на узлах 1, 2 и 3 при частоте 1 кГц.



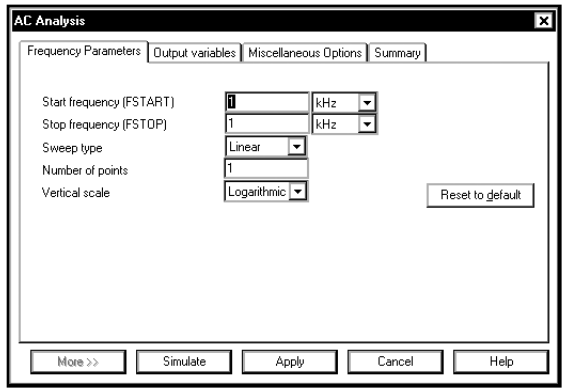
РЕШЕНИЕ: Включите источник напряжения в ветвь катушки индуктивности, чтобы измерять ток через нее. Настройте напряжение источника на 0 В:

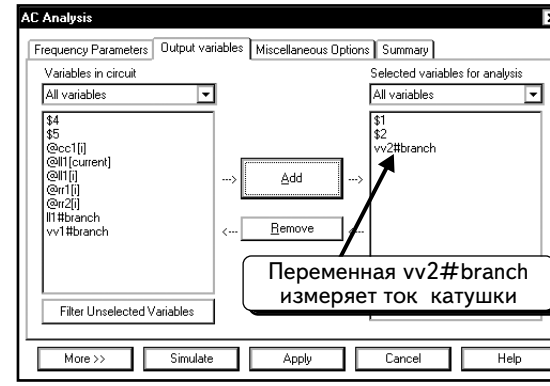


На вкладке ***Analysis Setup* (Настройка анализа)** в качестве источника **I1** выберем источник тока 2 А, а в качестве источника **V1** — источник напряжения на 12 В. Это те же действующие значения, что в **УПРАЖНЕНИИ 5-1.**

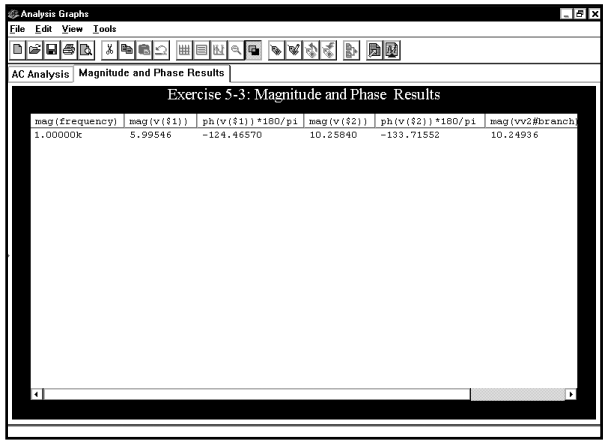


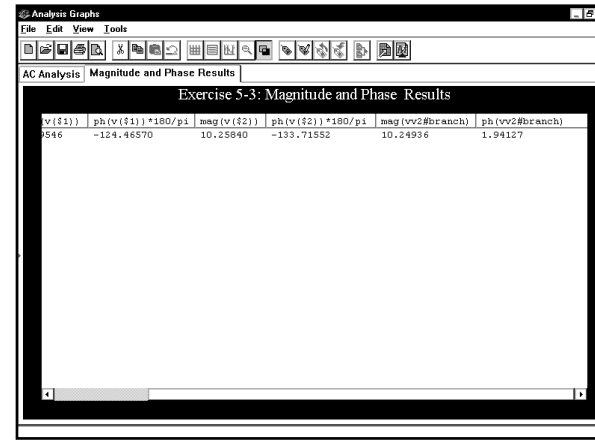
Введем данные в диалоговом окне **AC Analysis**, как показано ниже:



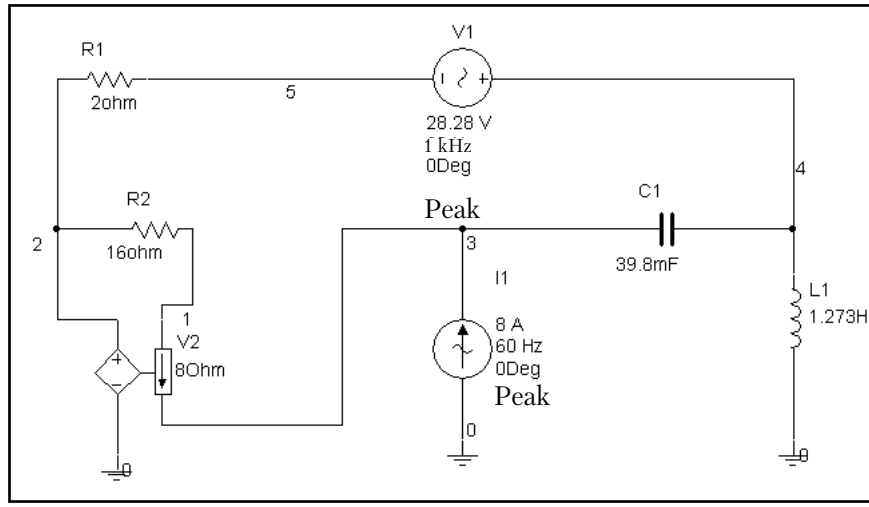


Результаты измерения модуля и фазы показаны ниже:

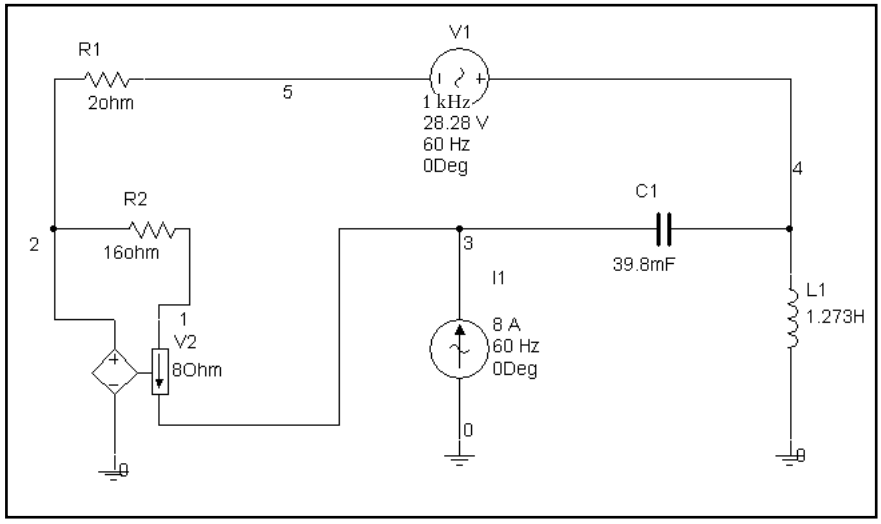




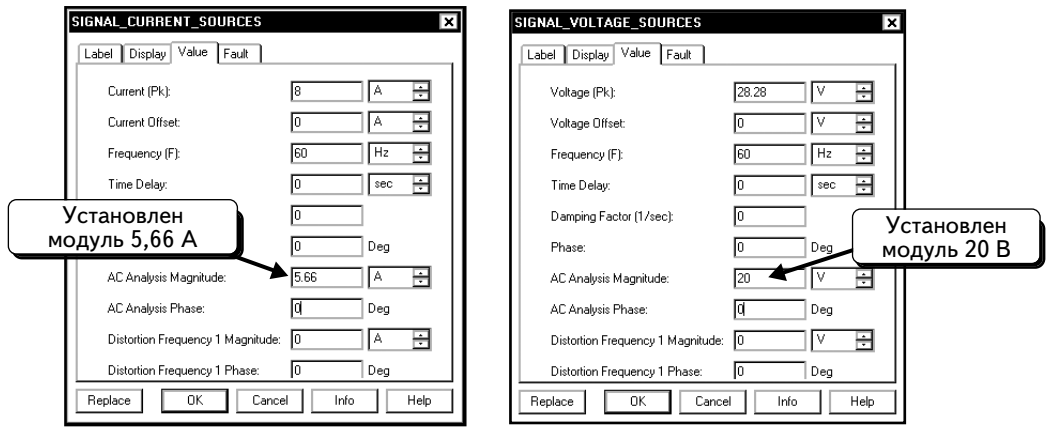
УПРАЖНЕНИЕ 5-4: С помощью функции **AC Analysis** определите модуль и фазу напряжения на узле 5 и ток через резистор **R1** при частоте 60 Гц:



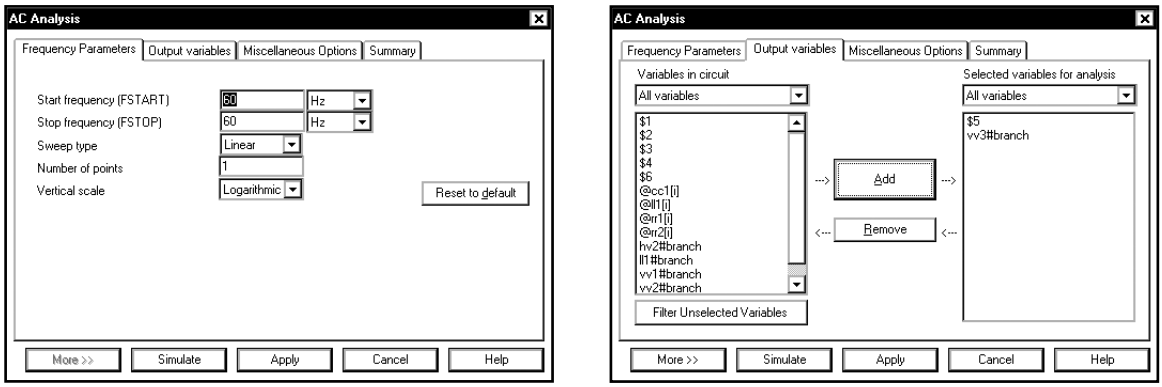
РЕШЕНИЕ: Чтобы измерить ток, добавим в схему источник постоянного напряжения 0 В, как показано ниже:



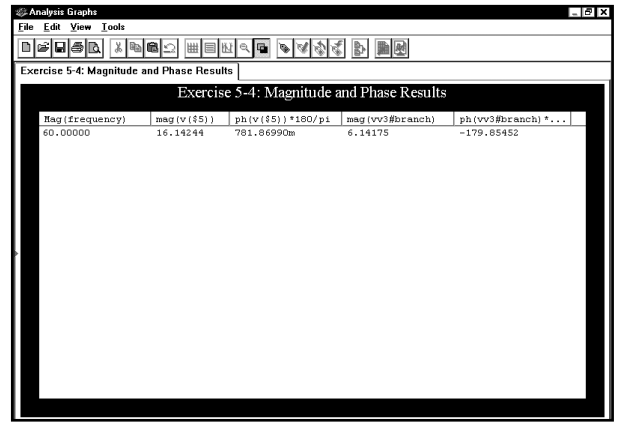
В разделе ***Analysis Setup* (Настройка анализа)** для двух источников выберите в качестве **I1** источник тока 5,66 А, а в качестве **V1** — источник напряжения 20 В, как в **УПРАЖНЕНИИ 5-2.**



Введите данные в диалоговом окне ***AC Analysis***, как показано ниже:



Результаты измерения модуля и фазы показаны ниже:



5.2. Графики Боде

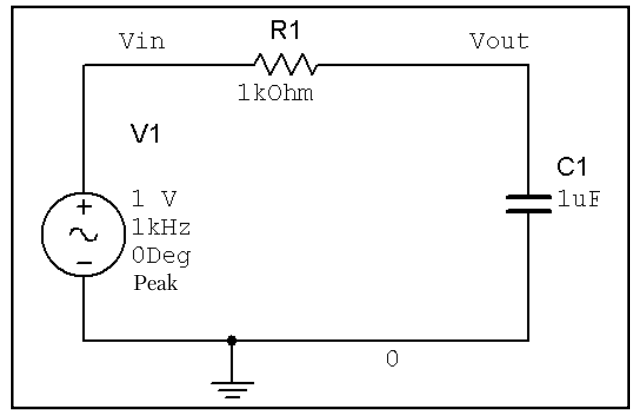
Графики Боде показывают зависимости модуля и фазы от частоты. Так как нас сейчас интересует модуль коэффициента усиления, будем работать с источником переменного напряжения 1 В. Все анализы переменного тока предполагают наличие линейной схемы: если выходное напряжение от входного источника с напряжением 1 В составляет 3 В, то выходное напряжение от источника с напряжением 10 В будет составлять 30 В. Коэффициент усиления представляет собой отношение выходного напряжения к входному, а поскольку схема линейна, амплитуда входного напряжения не имеет значения. Будем использовать источник напряжением 1 В, причем это источник сигнала, а не питания. Таким образом, в этом разделе модули выражаются максимальными значениями. Графики Боде позволяют определить фазу напряжения или тока, связанную с фазой источника. Чтобы упростить процесс, выберем фазу источника равной нулю.

Как и в большинстве моделей Multisim, можно исследовать схему с помощью Боде-плоттера или воспользоваться функцией SPICE **AC Analysis**. Боде-плоттер можно использовать только для формирования графиков Боде, функция же SPICE **AC Analysis** обладает более широкими возможностями. В данном разделе будет рассказано об обоих методах.

5.2.1. Создание графиков Боде с помощью Боде-плоттера

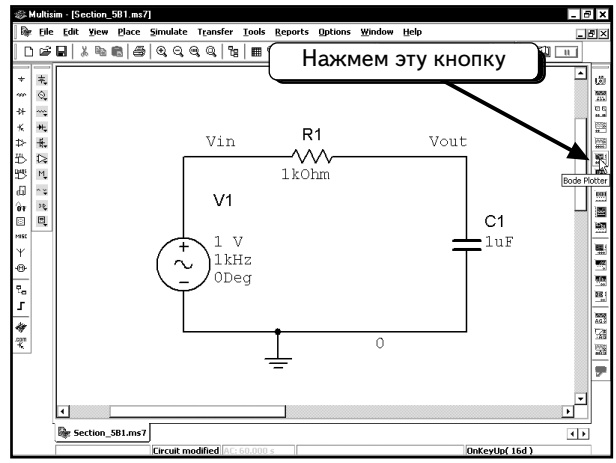
Сначала покажем, как использовать инструмент Боде-плоттер **(Bode Plotter)**. Этот метод позволяет быстро получать фазовые углы для токов и напряжений в схеме. Однако он имеет и ограничение: с помощью одного прибора можно просмотреть значение только для одного узла. Если надо работать с большой схемой и просмотреть значения для нескольких узлов, то придется применить функцию **AC Analysis**.

Создадим схему фильтра низкой частоты:

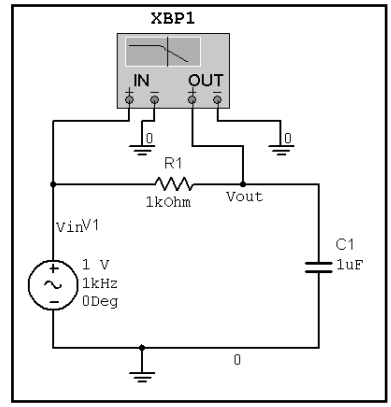


На низких частотах конденсатор представляет собой разрыв, и значение **Vout** должно равняться значению **Vin**. На высоких частотах конденсатор представляет собой короткое замыкание, и коэффициент усиления стремиться к нулю. Частота 3 дБ в схеме соответствует: $\omega = 1/R_1C_1 = 1000$ рад/с $\cong 159$ Гц.

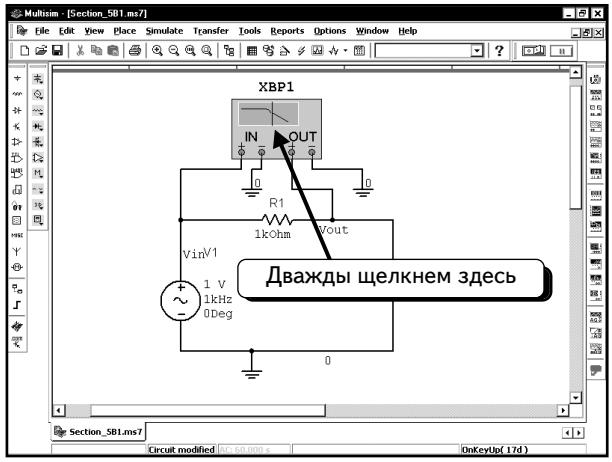
Далее нужно подключить к схеме Боде-плоттер. Нажмем кнопку **Bode Plotter** на панели инструментов **Instruments**, и условное обозначение плоттера появится на экране:

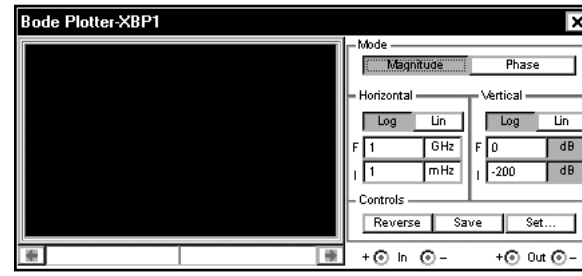


Подключим Боде-плоттер к схеме, как показано ниже:

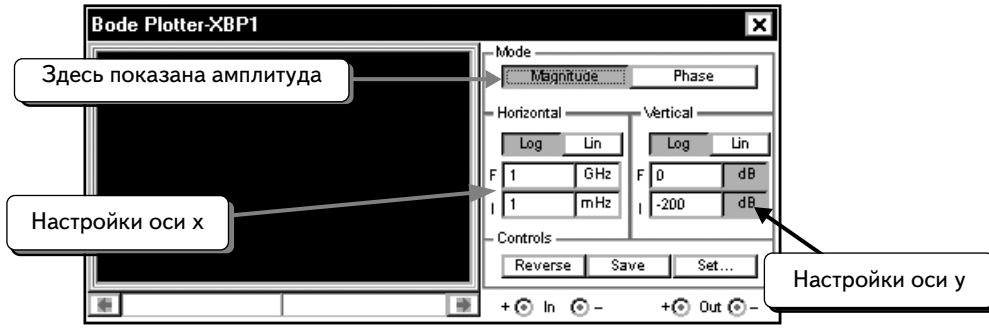


Сейчас можно выполнить моделирование или изменить параметры графика Боде. Покажем, как можно изменять параметры. Дважды щелкнем по условному обозначению плоттера, чтобы открыть окно:





В этом окне видны настройки плоттера по умолчанию:



Параметры по умолчанию предусматривают построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), для оси y должен использоваться диапазон от **0** до **–200 дБ**, а для оси x — диапазон от **1 мГц** (10^{-3} Гц) до **1 ГГц** (10^{9} Гц). Ось y показывает предварительный диапазон коэффициента усиления. Зная, что полюс частотной характеристики расположен на частоте 159 Гц, изменим диапазон по оси x, настроив его от 100 мГц до 10 МГц:

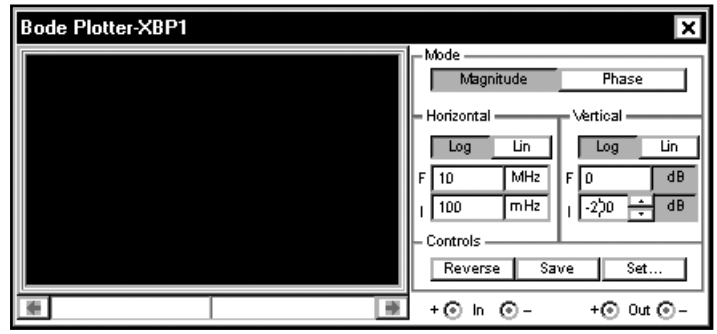
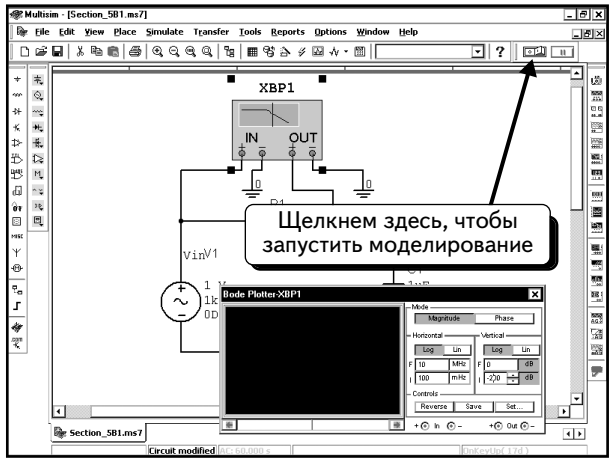
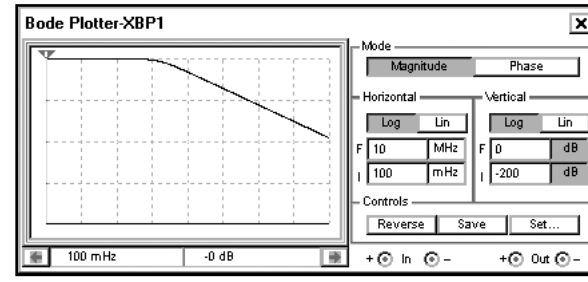


График функции выводится в небольшом окне Боде-плоттера. Мы не будем заниматься изменением настроек для оси y.

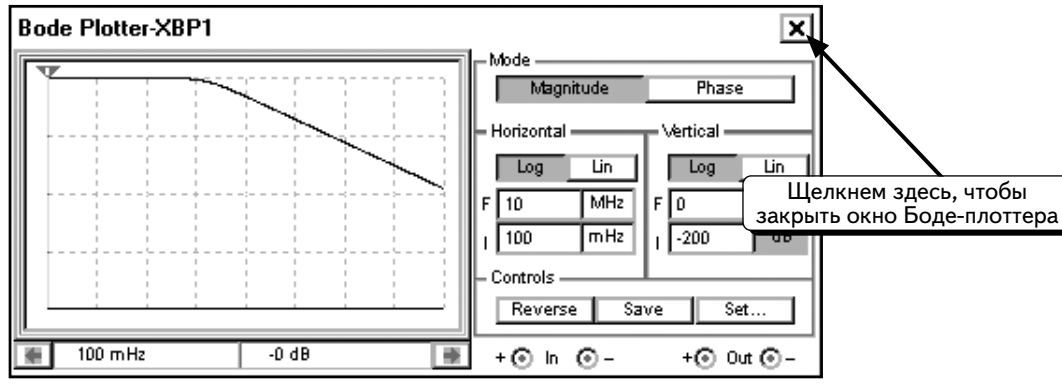
Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы смоделировать схему. **Боде-плоттер покажет АЧХ** коэффициента усиления, которая представляет собой отношение амплитуд (или действующих значений) выходного напряжения **out** к входному **in**:



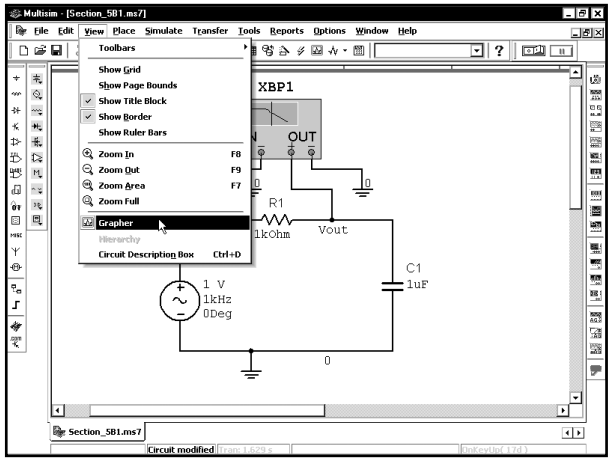


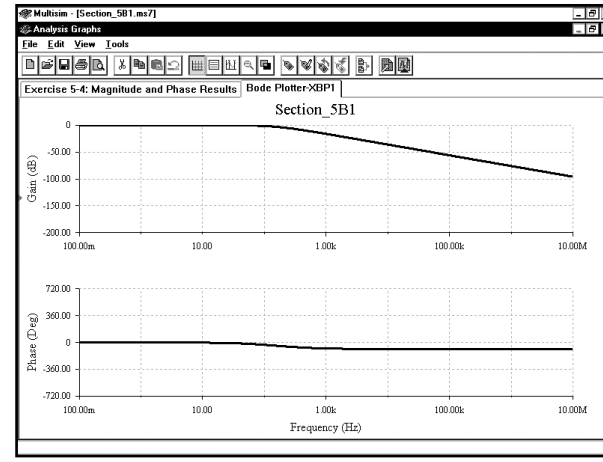
Как видим, ось y настроена не совсем правильно, так как кривая занимает только половину окна по вертикали. Кроме того, функция **Bode Plotter** не имеет шкал по осям. Удобнее просмотреть результаты с помощью программы Grapher.

Перед тем как использовать программу Grapher, следует закрыть окно **плоттера**, щелкнув по символу ☒ в верхнем правом углу:

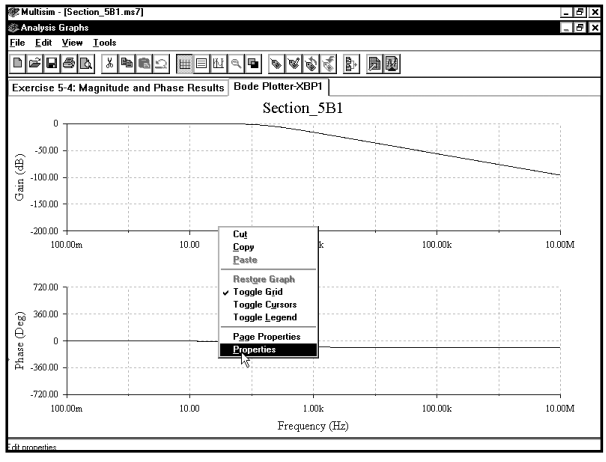


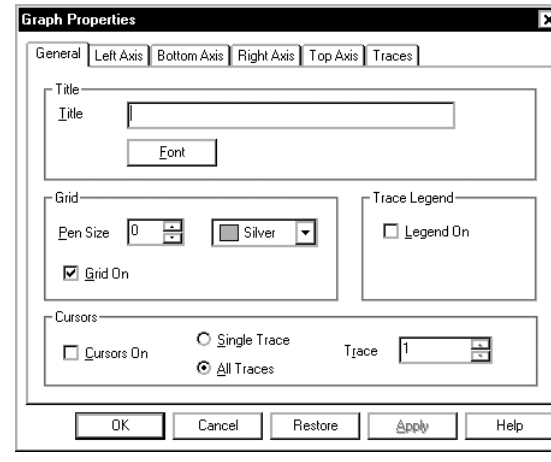
Теперь можно просмотреть результаты в окне Grapher. Выберите в меню пункты **View ⇒ Grapher**:





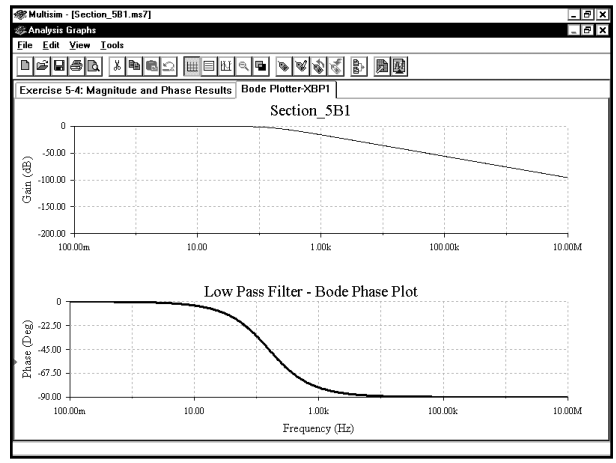
Теперь изменим график с помощью методик, которые были описаны в разделе 2.5. Чтобы изменить его параметры, щелкнем по нему ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши. В этом примере щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой по нижнему графику и выберем пункт **Properties**:



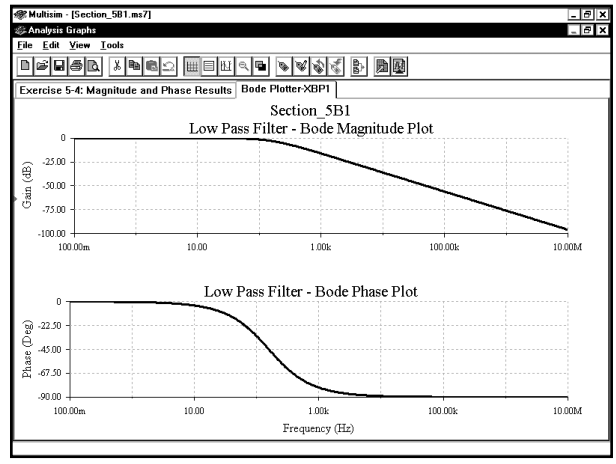


В этом диалоговом окне можно отобразить сетку (если она скрыта), изменить заголовок на **«Low Pass Filter — Bode Phase Plot»**, установить диапазон левой оси в пределах от –90 до 0° , а также настроить толщину кривой на 2.

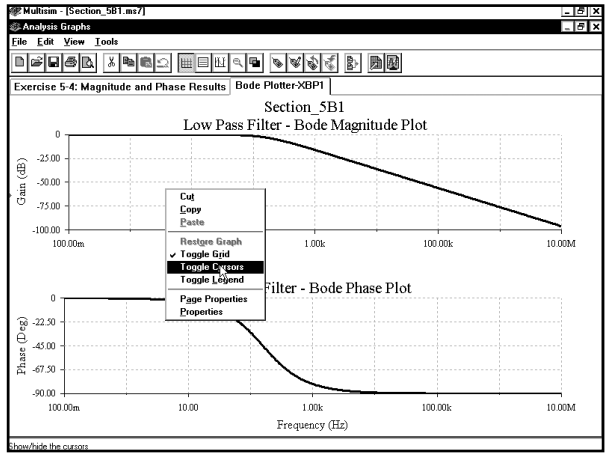
После внесения изменений нажмем кнопку **OK**:

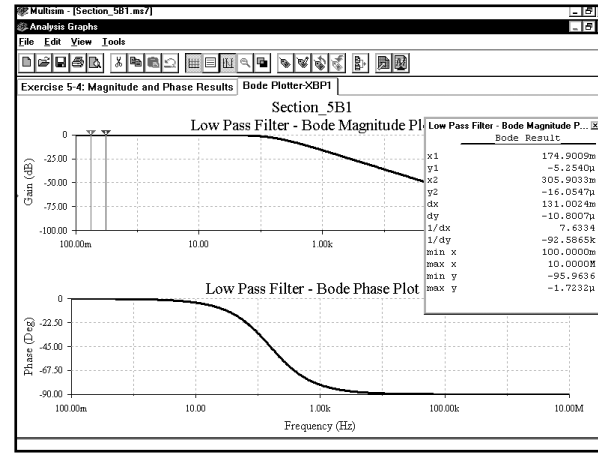


Чтобы отредактировать верхний график, щелкнем по нему ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выберем пункт **Properties.** Изменим, этот график так же, как и график для фазового угла, но введем заголовок **«Low Pass Filter — Bode Magnitude Plot»**, а диапазон по оси у установим в пределах от –100 до 0 дБ:

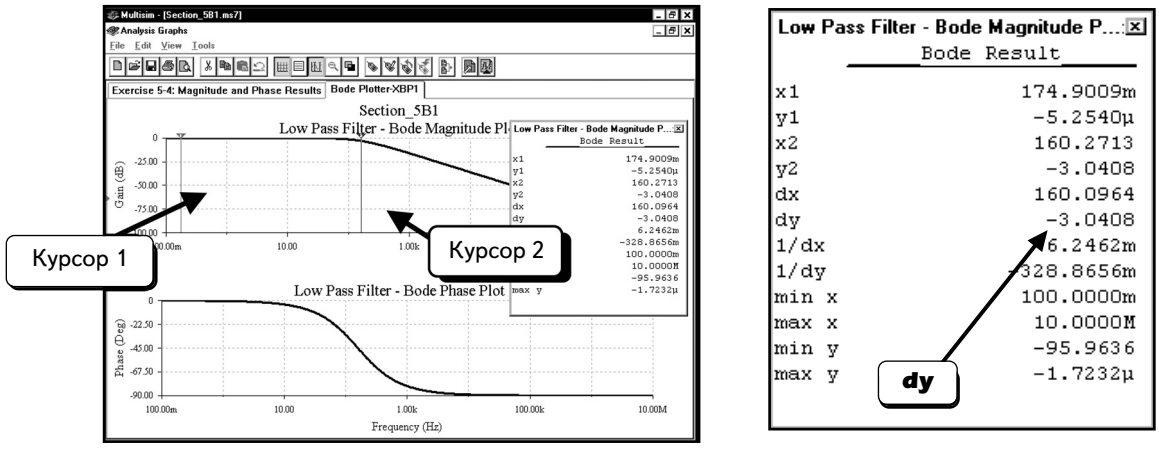


Можно использовать на верхнем графике курсоры, чтобы определить частоту, соответствующую –3 дБ. Для этого щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по верхнему графику и выберем пункт **Toggle Cursors**:





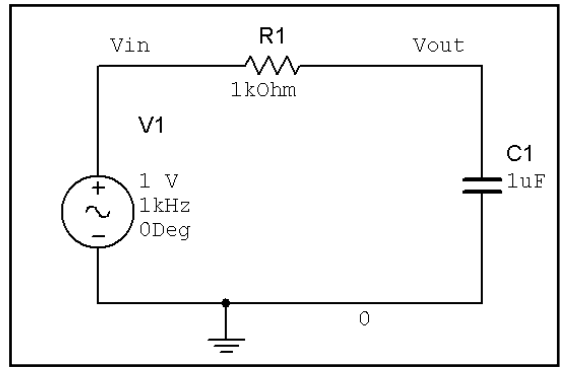
Поместим курсор 1 (красный) так, чтобы его значение **y1** было близким к 0 дБ. Поместим курсор 2 (синий) так, чтобы значение **dy** было близким к –3 дБ:



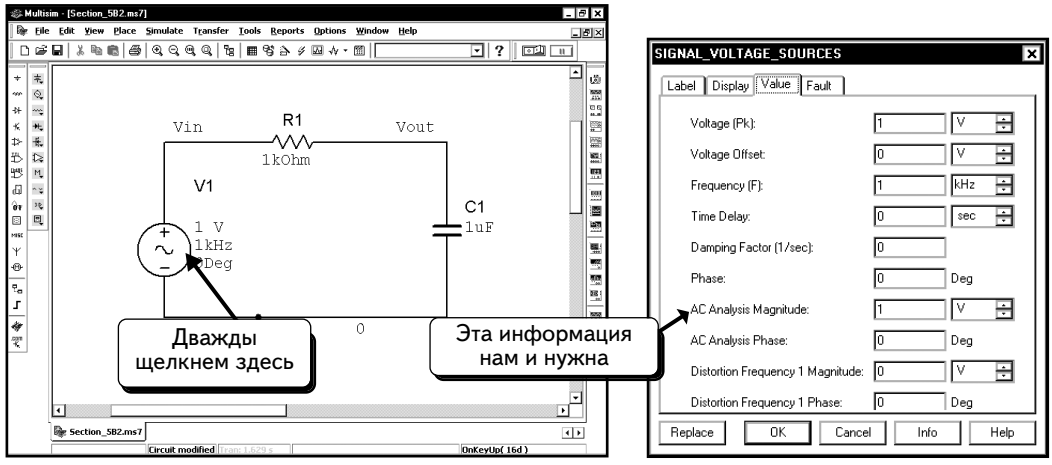
Координата x курсора 2 (**x2**) определяет координату частоты. В данном примере это значение равно примерно 160 Гц. Расчетное значение составляет 159 Гц. Небольшое отличие вызвано тем, что с помощью курсоров мы не смогли точно найти точку –3 дБ.

5.2.2. Создание графиков Боде с помощью функции AC Analysis

Теперь смоделируем точно такую же схему с помощью функции SPICE **AC Analysis**. Создадим схему, показанную ниже (Заметьте, что мы удалили Боде-плоттер, так как он не нужен для анализа **AC Analysis**):



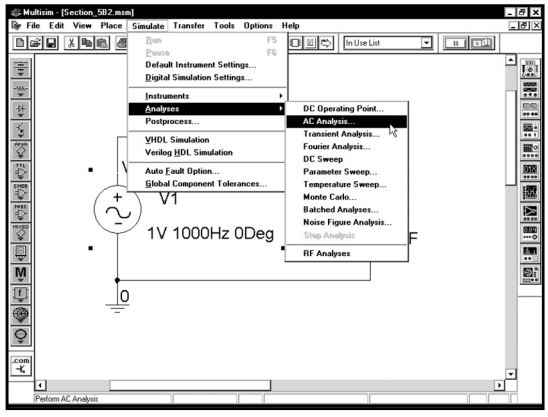
Сначала необходимо настроить параметры источника напряжения V1 для вариации. Для этого дважды щелкнем по иконке источника:

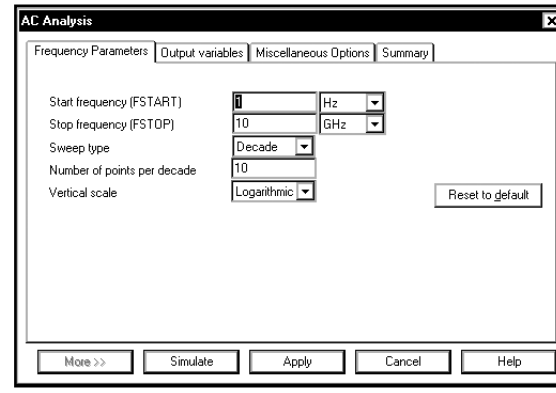


Мы не выполняем анализ искажений, поэтому можно проигнорировать соответствующие опции в диалоговом окне. Опции ***AC Analysis Magnitude*** **(Анализ амплитуды AC)** и ***AC Analysis Phase*** **(Анализ фазы AC)** указывают параметры источника и характеристики, которые будут строиться во время анализа. Амплитуда источника, используемого для анализа, будет составлять 1 В, а фаза — 0° (то есть комплексное напряжение V1 = 1∠0°).

Так как коэффициент усиления для схемы это отношение напряжения на узле **Vout** к напряжению на узле **Vin**, источник с напряжением 1 В упрощает наши расчеты. Для этого сеанса не понадобится изменять параметры. Впрочем, теперь известно, где их можно найти и как изменить. Нажмем кнопку ***OK***, чтобы вернуться к схеме.

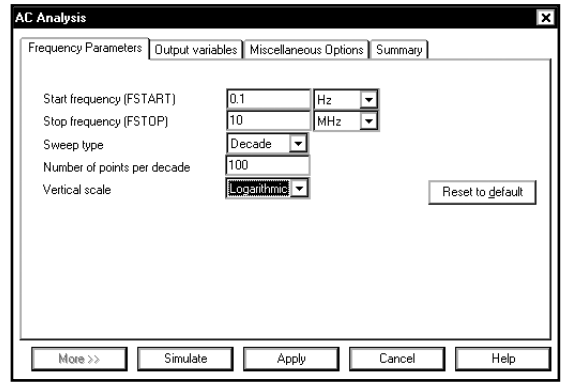
Настроим и выполним анализ **AC Analysis**. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Analyses ⇒ AC Analysis**:





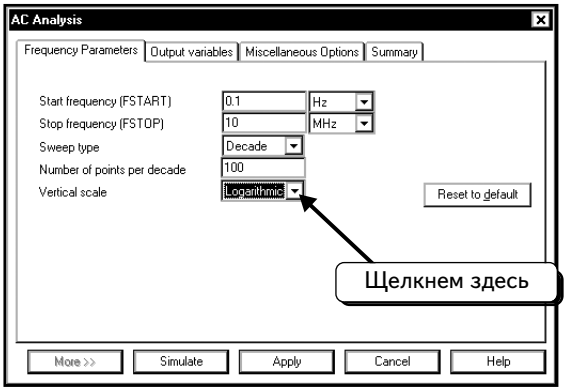
Первая вкладка позволяет указать диапазон частоты, тип анализа и количество точек. Декада представляет собой диапазон, при котором частота увеличивается в 10 раз. Например, декадами являются диапазоны от 1 до 10 Гц, от 10 до 100 Гц, от 100 до 1000 Гц и так далее. Если вы настраиваете анализ в ***Decades*** **(декадах)**, то необходимо указать количество точек в декаде (при этом используется разметка логарифмической шкалы). Например, при текущих настройках в диапазоне от 1 до 10 Гц, от 10 до 100 Гц и так далее будет располагаться по 10 точек.

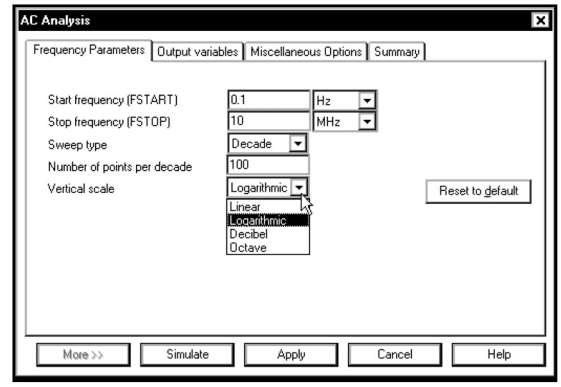
Можно использовать октавный или линейный тип анализа. Октава представляет собой диапазон, при котором частота увеличивается в 2 раза, например диапазон от 1 до 2 Гц, от 2 до 4 Гц и так далее. При октавном анализе указывается количество точек в октаве, при линейном анализе — общее количество точек. Линейный анализ удобен, когда начальная и конечная частоты являются величинами одного порядка (например при изменении от 1 до 5 кГц). Октавный анализ удобен при работе в широком диапазоне частот (например от 1 Гц до 5 МГц).
Настроим анализ с использованием параметров, которые указаны при работе с Боде-плоттером на с. 254:



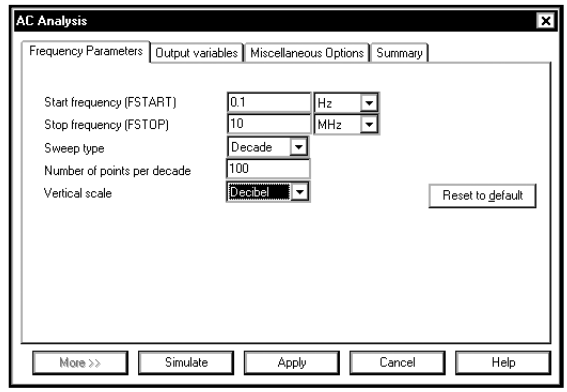
Параметры в этом диалоговом окне настроены на декадное изменение частоты от ***0,1*** Гц (100 мГц) до ***10*** МГц, причем для каждой декады вычисляется ***100*** точек.

Наконец, настроим опцию **Vertical Scale (Вертикальный масштаб)** для АЧХ. Щелкнем по символу в виде треугольника ▼, как показано ниже:

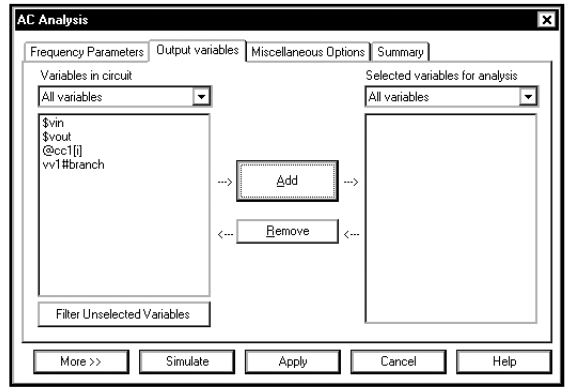




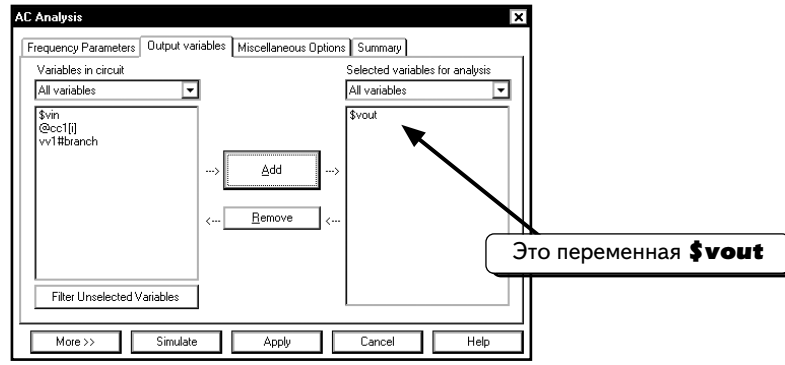
Опция **Linear** указывает, что для оси у графика амплитуды должен использоваться линейный масштаб, а опция **Logarithmic** настраивает ось у графика на десятичную логарифмическую шкалу. Таким образом, значения, отличающиеся в 10 раз, будут размещаться на равном расстоянии друг от друга (то есть расстояние в диапазоне от 1 до 10 будет равно расстоянию в диапазоне от 100 до 1000 и так далее). Опция **Octave** настраивает ось у графика на масштаб с коэффициентом 2. При этом расстояние в диапазоне от 1 до 2 будет равно расстоянию в диапазоне от 2 до 4 и так далее. Опция **Decibel (Децибел)** указывает, что график модуля должен отображаться в дБ: 20lg(Vout/Vin). На стандартном графике Боде отображается зависимость модуля в децибелах от частоты (такая характеристика называется логарифмической амплитудно-частотной характеристикой ЛАЧХ). Выберем опцию **Decibel**:



Далее нужно выбрать переменные выхода для модели. Щелкнем по вкладке **Output variables**:

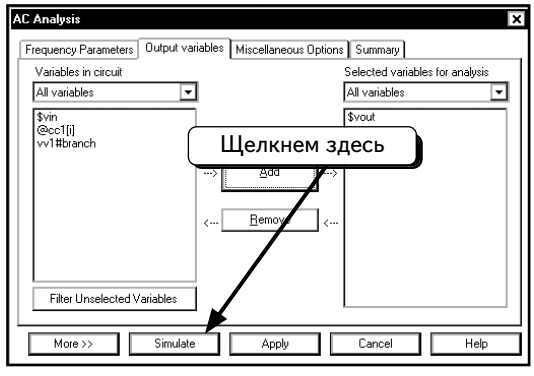


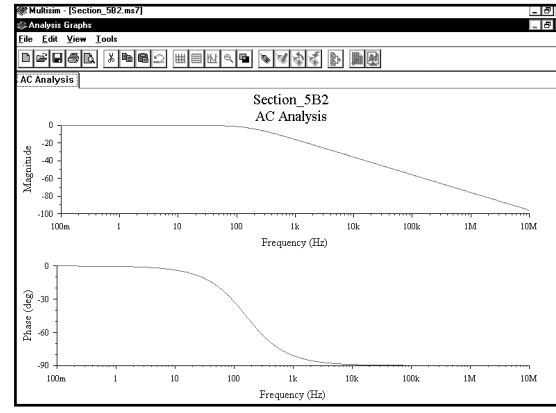
Щелкнем по переменной **$vout** и нажмем кнопку **Add**, чтобы добавить переменную в правое окно:



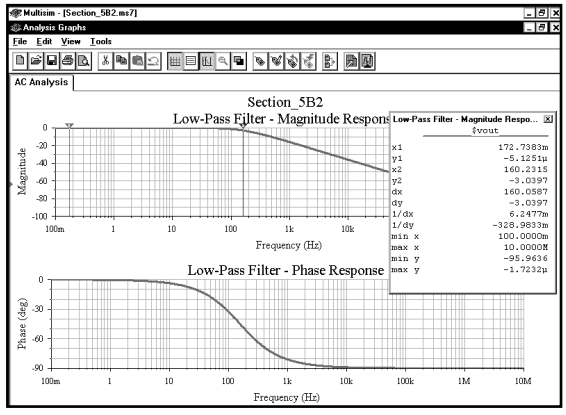
Теперь данные узла **Vout** будут доступны.

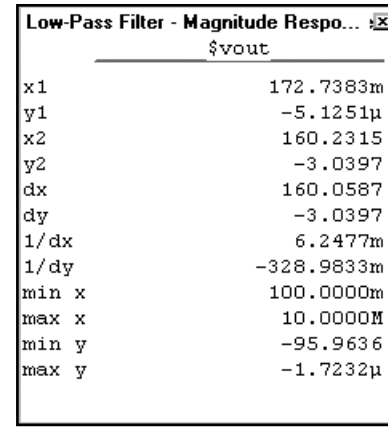
Теперь все готово к моделированию, щелкнем по кнопке **Simulate**:





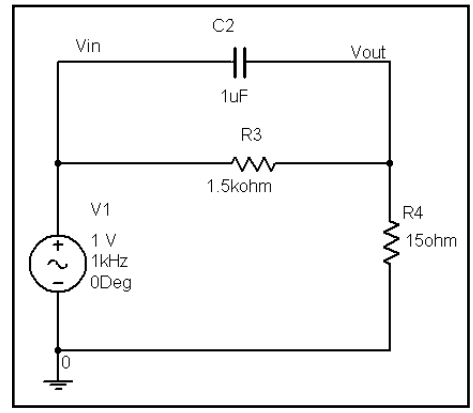
На графиках видно, что автоматически отобразились относительный модуль и фаза напряжения на узле **Vout**. Эти графики очень схожи с графиками, которые мы получили с помощью Боде-плоттера (см. с. 257). Можно воспользоваться методиками, описанными на с. 255-257, чтобы построить график, который показан на с. 257:





Измерение с помощью курсоров показывает, что частота, соответствующая –3 дБ, равна **160,2315** Гц. Это очень близко к значению, полученному в предыдущем разделе. Оба значения немного отличаются от расчетного, так как мы не смогли точно определить точку –3 дБ с помощью курсоров. Чтобы получить более точное значение, нужно увеличить количество точек на декаду при настройке функции AC Analysis.

УПРАЖНЕНИЕ 5-5: Постройте графики Боде для модуля и фазы в диапазоне частоты от 1 Гц до 1 МГц. С помощью курсоров определите частоту полюсов и нулей частотной характеристики:



АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ: На низких частотах конденсатор является разрывом цепи. Чтобы рассчитать напряжение **Vout**, необходимо воспользоваться выражением для делителя напряжения, состоящего из резисторов **R3** и **R4**:

$$Vout/Vin = R_4/(R_3 + R_4) = 0{,}0099 = -40 \text{ дБ}.$$

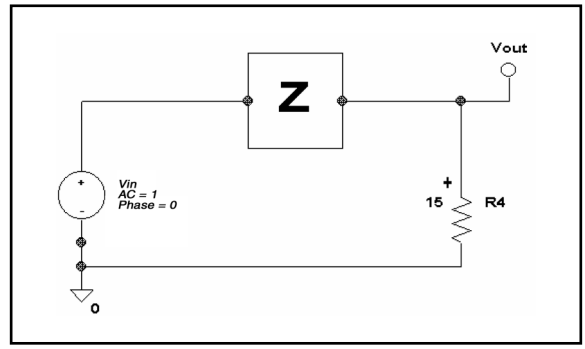
На высоких частотах конденсатор представляет собой короткое замыкание. Значение **Vout** равно значению **Vin**. Следовательно:

$$Vout/Vin = 1 = 0 \text{ дБ}.$$

Таким образом, мы предполагаем, что график АЧХ начинается в точке –40 дБ и заканчивается в точке 0 дБ. Где должны располагаться максимумы и нулевые точки? Допустим, что:

$$Z = Z_C \| R_3 = (1/j\omega C_2)R_3/[(1/j\omega C_2) + R_3] = R_3/(1 + j\omega R_3 C_2).$$

При замене значения Z на $Z_C \| R_3$ получим эквивалентную схему:



Теперь можно получить выражение для коэффициента усиления из формулы для делителя напряжения, состоящего из **R4** и **Z**:

$$Vout/Vin = R_4/(Z + R_4) = R_4/[R_3/(1 + j\omega R_3 C_2) + R_4].$$

Умножив числитель и знаменатель на $(1 + j\omega R_3 C_2)$, получаем:

$$Vout/Vin = R_4(1 + j\omega R_3 C_2) / (R_3 + R_4 + j\omega C_2 R_3 R_4).$$

Как видим, нуль функции появляется при условии $1 = \omega R_3 C_2$ или:

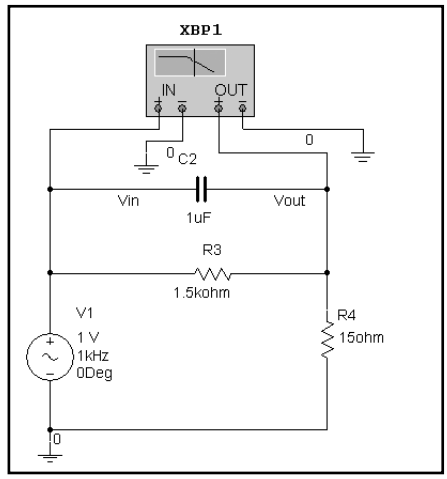
$$\omega_z = 1/R_3C_2 = 1/(1500\ \text{Ом})(1\ \text{мкФ}) = 666\ \text{рад/с} = 106\ \text{Гц}.$$

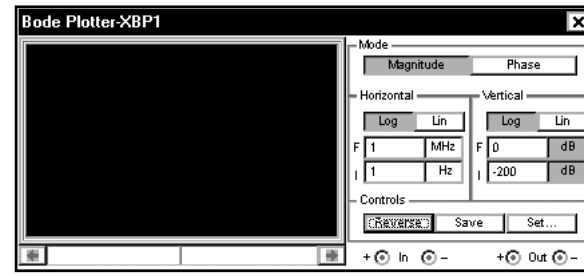
Полюс появляется при $R_3 + R_4 = \omega C_2 R_3 R_4$ или:

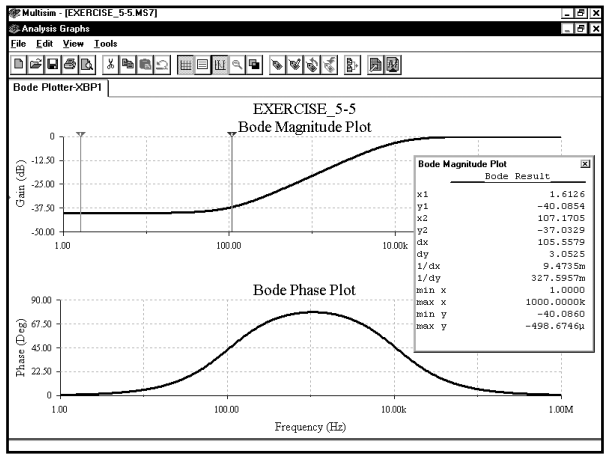
$$\omega_P = (R_3 + R_4)/C_2R_3R_4 = 1/C_2[R_3R_4/(R_3 + R_4)] = 1/C_2(R_3 \| R_4) =$$

$$= 1/(1\ \text{мкФ})(1500\ \text{Ом} \| 15\ \text{Ом}) = 66{,}6 \cdot 10^3\ \text{рад/с} = 10{,}6\ \text{кГц}.$$

РЕШЕНИЕ: Воспользуйтесь Боде-плоттером, установив диапазон частот от 1 Гц до 1 МГц. Отобразите результаты в окне Grapher и определите числовые значения с помощью курсоров:







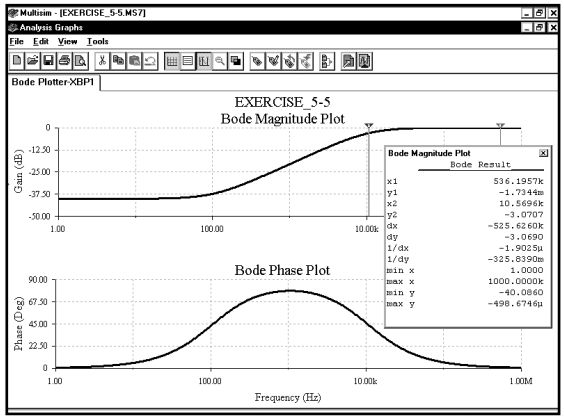
Bode Magnitude Plot

Bode Result

x1	1.6126
y1	-40.0854
x2	107.1705
y2	-37.0329
dx	105.5579
dy	3.0525
1/dx	9.4735m
1/dy	327.5957m
min x	1.0000
max x	1000.0000k
min y	-40.0860
max y	-498.6746µ

Курсоры на графике вверху показывают, что нулевая точка появляется при частоте приблизительно **107** Гц. Это значение очень близко к расчетному значению 106 Гц.

Далее определим положение полюса с помощью курсоров:

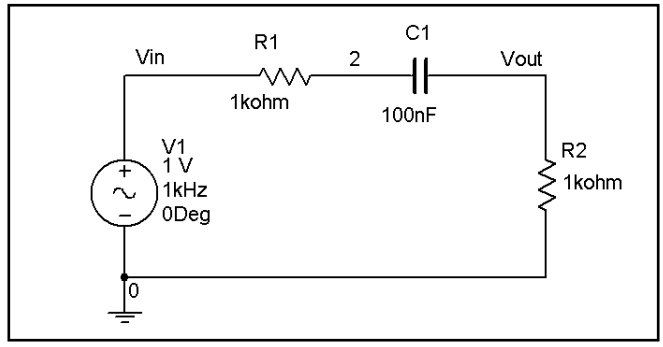


Bode Magnitude Plot

Bode Result	
x1	536.1957k
y1	-1.7344m
x2	10.5696k
y2	-3.0707
dx	-525.6260k
dy	-3.0690
1/dx	-1.9025µ
1/dy	-325.8390m
min x	1.0000
max x	1000.0000k
min y	-40.0860
max y	-498.6746µ

Курсоры показывают, что частота полюса приблизительно равна **10,57 к**Гц. Это значение также очень близко к расчетному значению 10,6 кГц.

УПРАЖНЕНИЕ 5-6: Постройте графики Боде для фазы и модуля в диапазоне частоты от 1 Гц до 1 МГц. С помощью курсоров определите частоту полюсов и нулей:



АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ: На низких частотах конденсатор является разрывом цепи и напряжение **Vout** равно нулю. При повышении частоты сопротивление конденсатора будет уменьшаться, а напряжение **Vout** — увеличиваться. Таким образом, на низких частотах коэффициент усиления должно выражаться большим отрицательным числом, которое увеличивается со скоростью около 20 дБ/декаду. На высоких частотах конденсатор является коротким замыканием. Значение **Vout** можно определить с помощью формулы для делителя напряжения, состоящего из резисторов R_1 и R_2:

$$\text{Vout} / \text{Vin} = R_2 / (R_2 + R_1) = 0{,}5 = -6 \text{ дБ}.$$

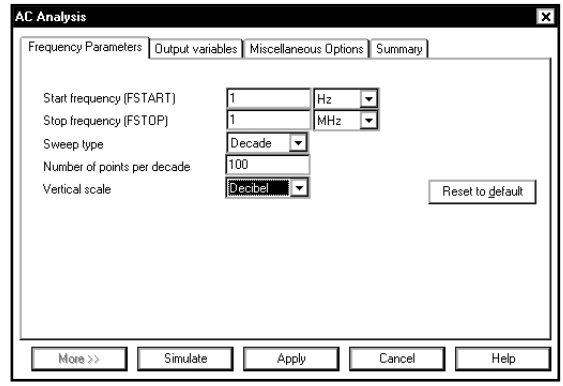
Итак, предположим, что график амплитуды начинается в отрицательной точке и заканчивается в точке –6 дБ. Где должны располагаться полюса и нули? Можно получить коэффициент усиления из выражения для делителя напряжения, образованного элементами **R1**, **R2** и **C1**:

$$\text{Vout} / \text{Vin} = R_2 / (R_1 + R_2 + Z_C) = R_2 / [R_1 + R_2 + (1 / j\omega C_1)] = j\omega C_1 R_2 / [1 + j\omega C_1 (R_1 + R_2)].$$

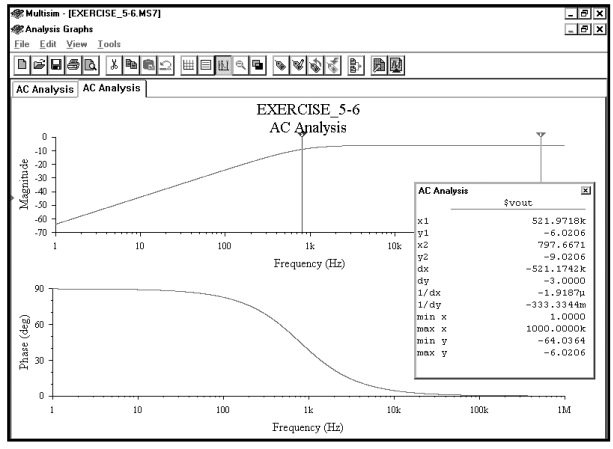
Как видим, нуль расположен при частоте $\omega = 0$ рад/с, а полюс — при частоте, соответствующей условию $1 = \omega C_1(R_1 + R_2)$ или

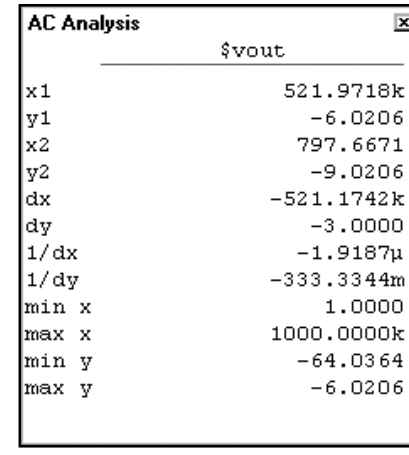
$$\omega_p = 1 / C_1(R_1 + R_2) = 1 / (100 \text{ мкФ})(1000 \text{ Ом} + 1000 \text{ Ом}) = 5000 \text{ рад/с} = 795{,}8 \text{ Гц}.$$

РЕШЕНИЕ: Воспользуйтесь Боде-плоттером, установив диапазон частот от 1 Гц до 1 МГц при шаге в 100 точек на декаду:



Отобразите переменную **Vout** и с помощью курсоров найдите точку –3 дБ:





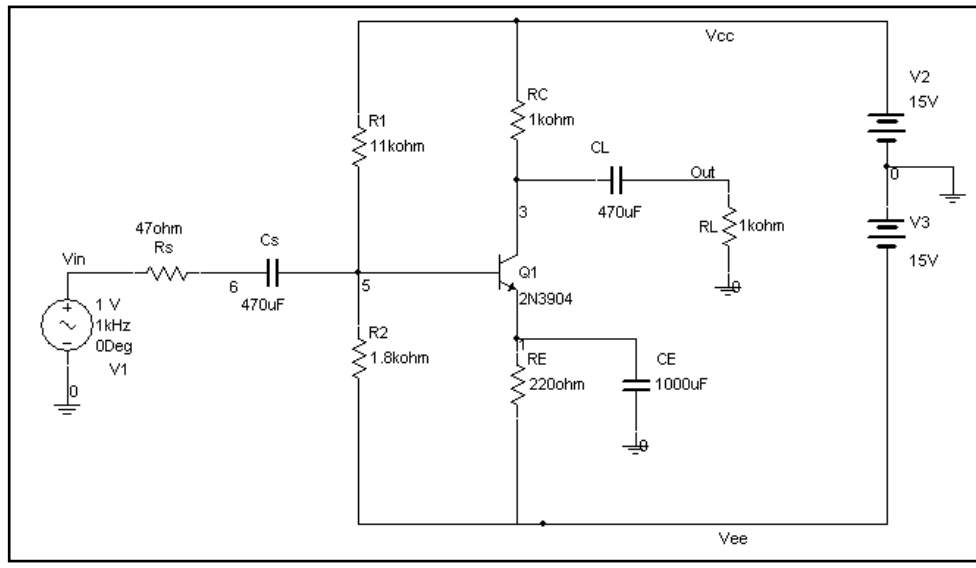
Курсоры показывают, что полюс расположен на частоте приблизительно равной 797,7 Гц. Это значение очень близко к расчетному значению 795,8 Гц.

5.3. Анализ коэффициента усиления усилителя

Одна из важнейших функций анализа **AC Analysis** и инструмента **Bode Plotter** — это построение частотной характеристики усилителя. Если анализ **AC Analysis** или Боде-плоттер используется в схеме транзисторного усилителя, то рассчитывается точка смещения, а транзистор заменяется малосигнальной моделью, для которой и получается частотная характеристика. С помощью функции **AC Analysis** и Боде-плоттера можно определить только коэффициент усиления при малом сигнале и частотную характеристику. Для получения информации о размахе выходного напряжения, его ограничении и насыщении транзистора придется воспользоваться анализом переходных процессов или использовать информацию о рабочей точке.

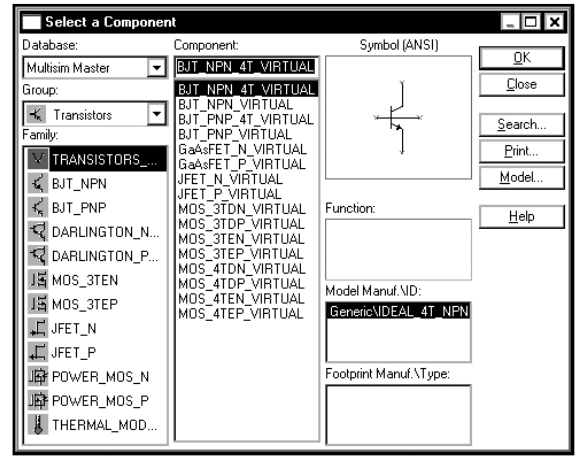
В этом примере можно использовать как функцию **AC Analysis**, так и инструмент **Bode Plotter**. Результаты не должны отличаться. Будем работать с Боде-плоттером.

Создадим схему транзисторного усилителя, которая показана ниже:

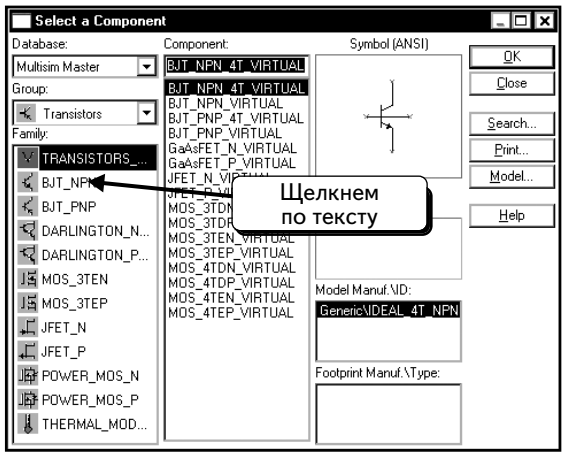


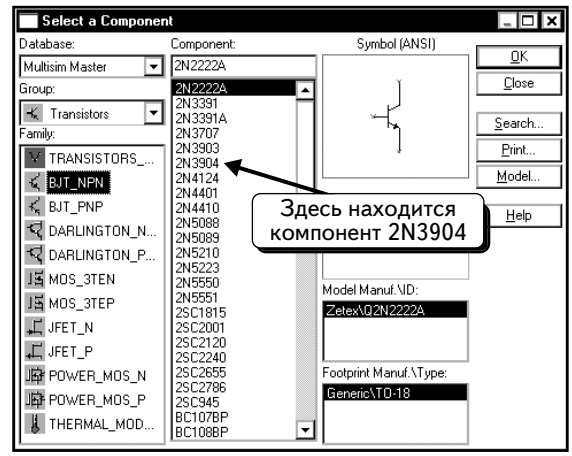
Чтобы добавить в схему транзистор 2N3904 NPN BJT, нажмем кнопку **Transistor**:





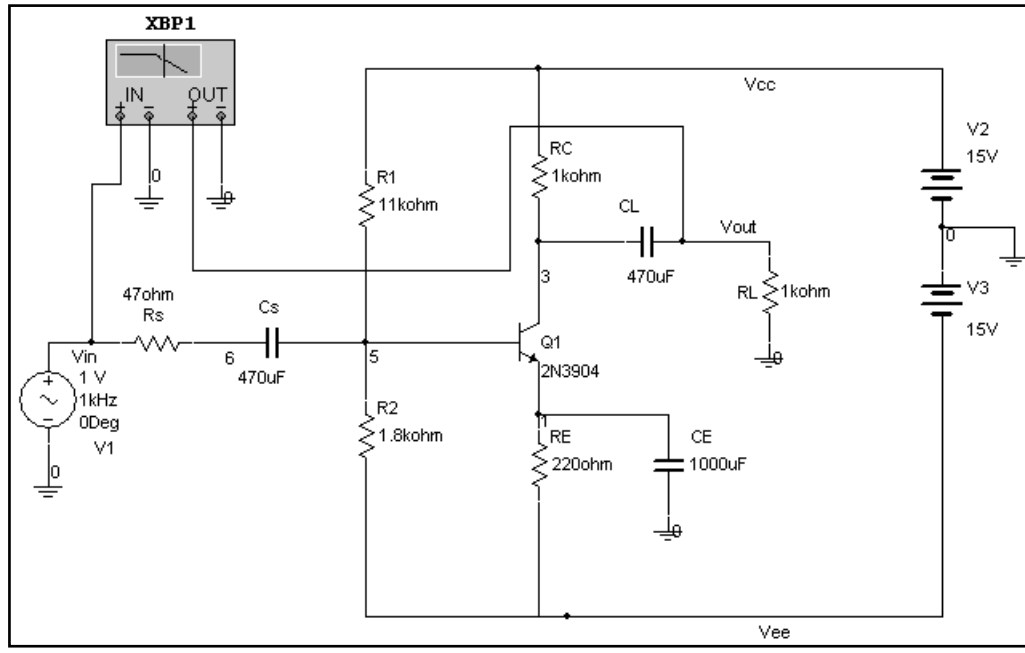
Щелкнем по пункту **BJT_NPN**, чтобы просмотреть список доступных транзисторов:



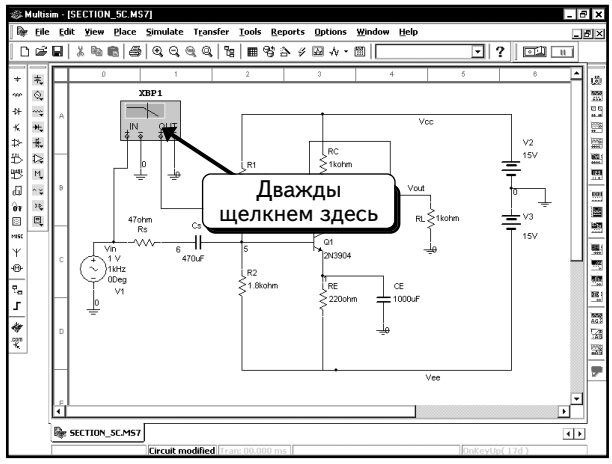


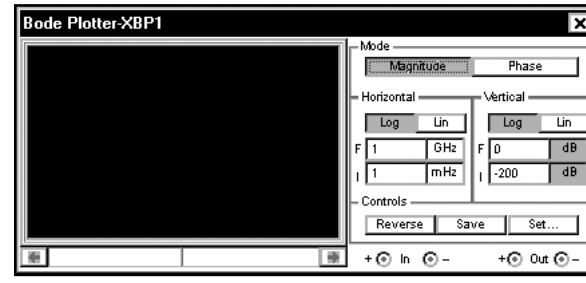
Теперь можно выбрать транзистор 2N3904 и добавить его в схему.

Мы хотим получить частотную зависимость коэффициента усиления схемы в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц. Подключим Боде-плоттер к узлам **Vin** и **Vout** :



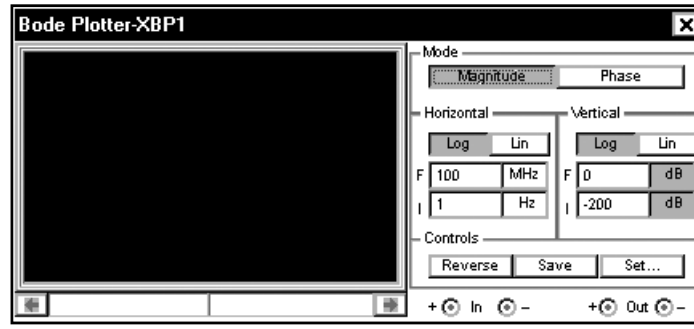
Далее надо установить параметры графика Боде. Дважды щелкнем по Боде-плоттеру, чтобы открыть окно, показанное ниже :



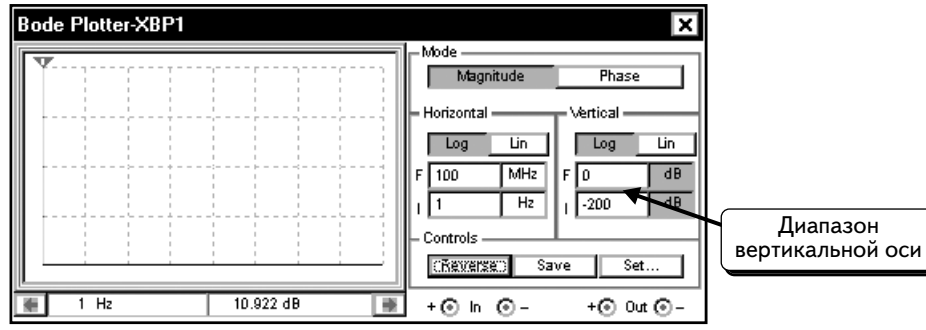


Инструмент настроен на изменение частоты в диапазоне от **1 mHz (мГц)** до **1 GHz (ГГц)**.

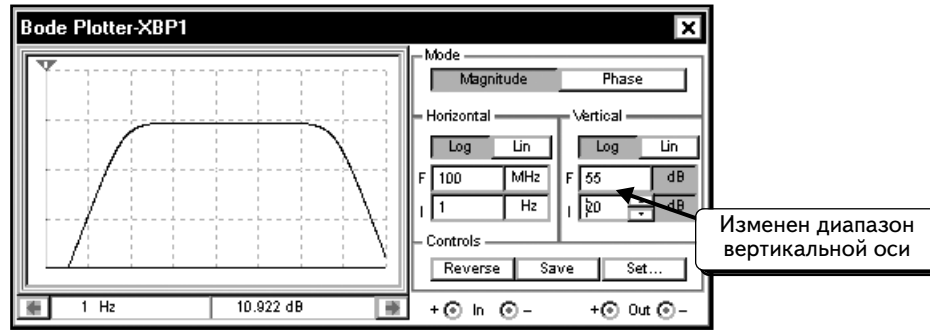
Необходимо моделировать схему в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц, поэтому изменим параметры в диалоговом окне так, как показано ниже:



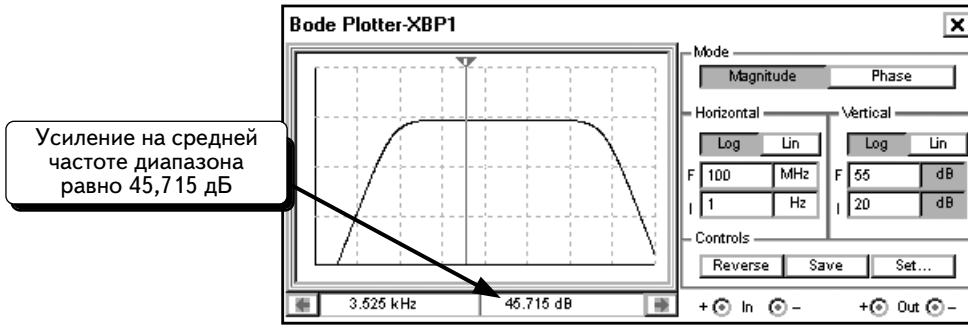
Нажмем кнопку **Run/stop simulation**, чтобы начать моделирование. В окне Боде-плоттера должна появится ЛАЧХ усилителя:



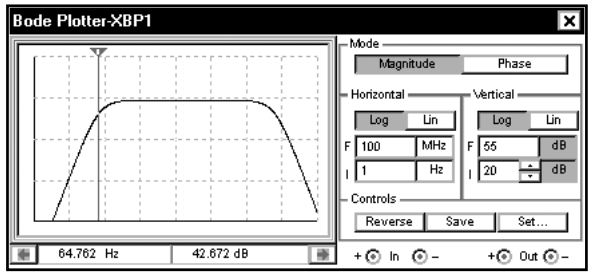
Где же график? По умолчанию для вертикальной оси (оси y) используется диапазон от –200 до 0 дБ. Коэффициент усиления для усилителя на средних частотах составляет примерно 45 дБ. Это значение выходит за границы диапазона, установленного по вертикальной оси. Установим диапазон вертикальной оси в пределах 20–55 дБ. После изменения в окне инструмента **Bode Plotter** появится график Боде:

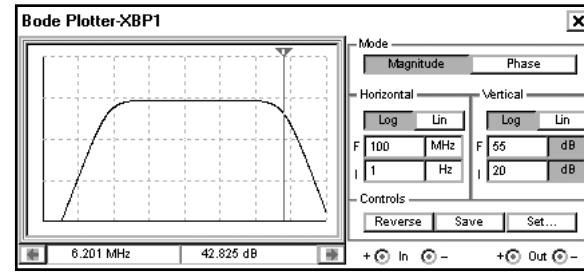


Если переместить курсор к центру графика, значение усиления будет равно 45,715 дБ, что близко к ожидаемому значению:



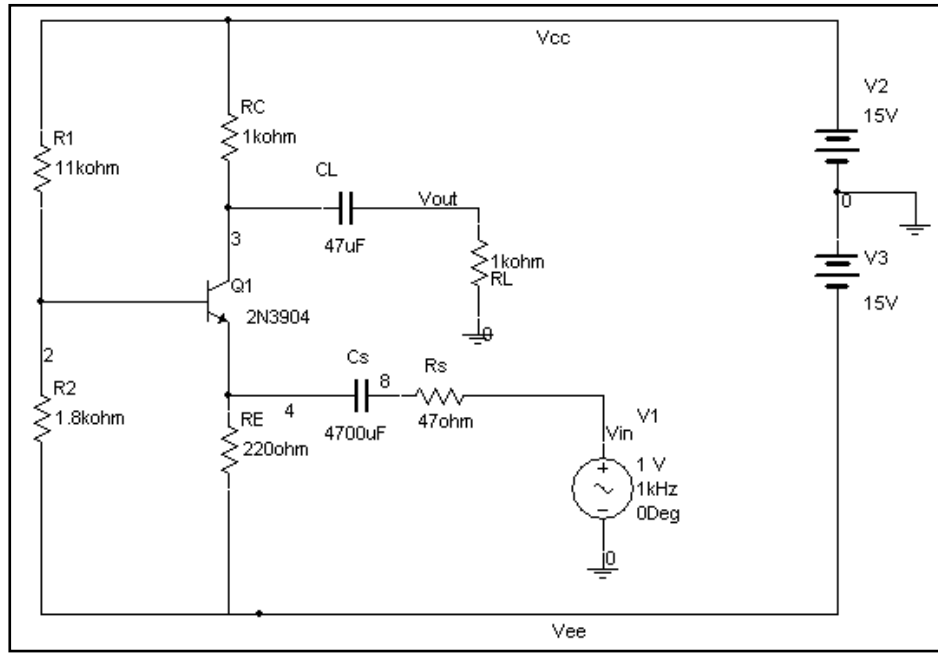
С помощью курсора можно определить верхнюю и нижнюю граничные частоты, соответствующие снижению усиления на 3 дБ. Усиление составляет 45,7 дБ, поэтому коэффициент усиления при снижении на 3 дБ составит 42,7 дБ. С помощью курсора нетрудно определить две искомые точки:



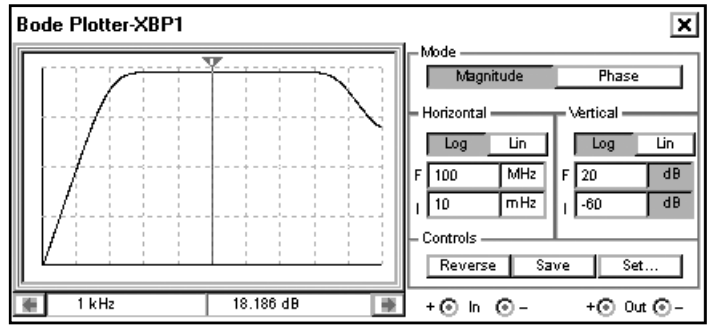


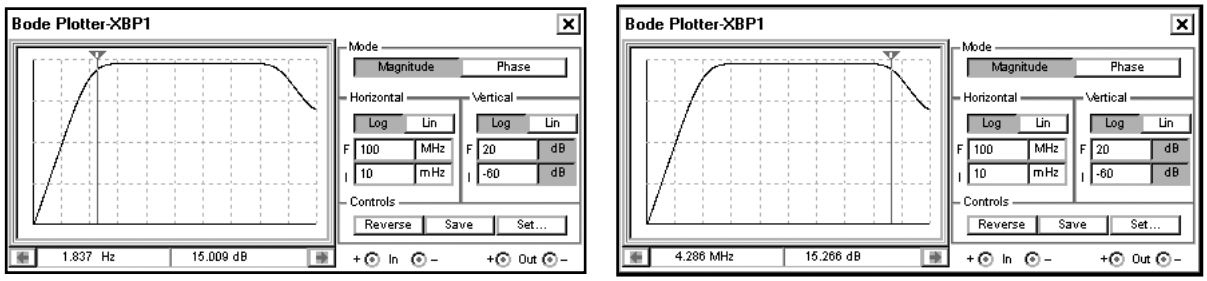
Как видим, нижнее значение частоты –3 децибел составляет **64,762 Гц**, а верхнее значение — **6,201 МГц.**

УПРАЖНЕНИЕ 5-7: Определите среднее усиление, а также верхнее и нижнее значения частоты –3 дБ для усилителя, показанного ниже:



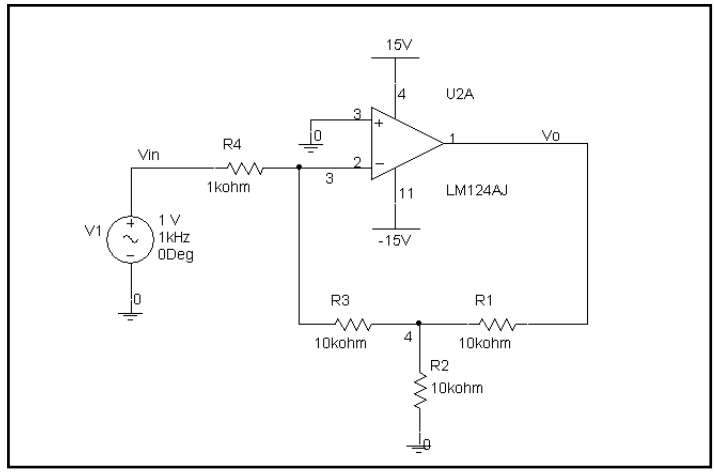
РЕШЕНИЕ: Подключите к схеме Боде-плоттер и проведите моделирование для диапазона частот от 10 мГц до 100 МГц:



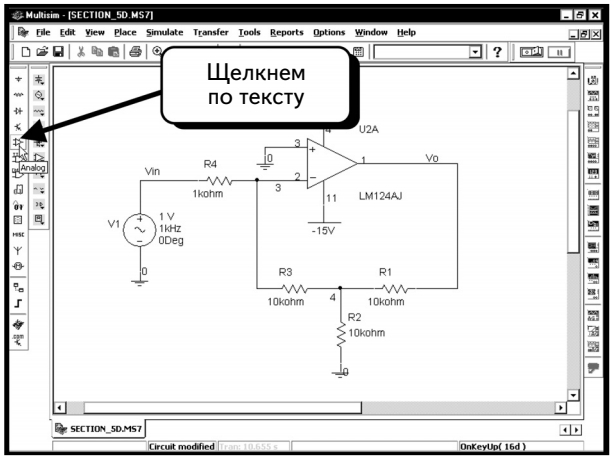


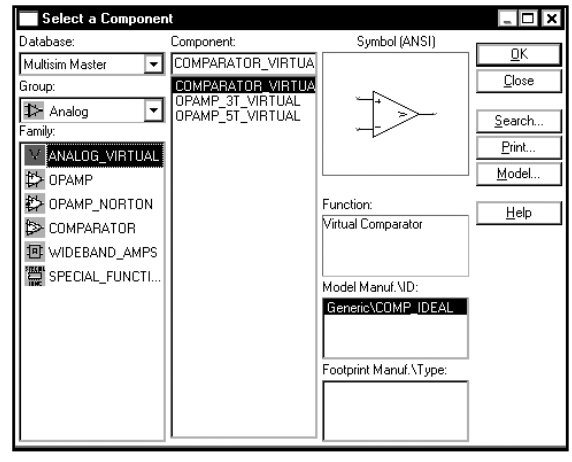
5.4. Коэффициент усиления операционного усилителя

В этом разделе используем программу Multisim, чтобы определить коэффициент усиления и полосу пропускания схемы усилителя на базе операционного усилителя (ОУ) с отрицательной обратной связью (negative feedback). Так как в предыдущем разделе использовали Боде-плоттер, то сейчас воспользуемся функцией **AC Analysis**. Определим усиление и верхнее значение граничной частоты –3 дБ для следующей схемы:

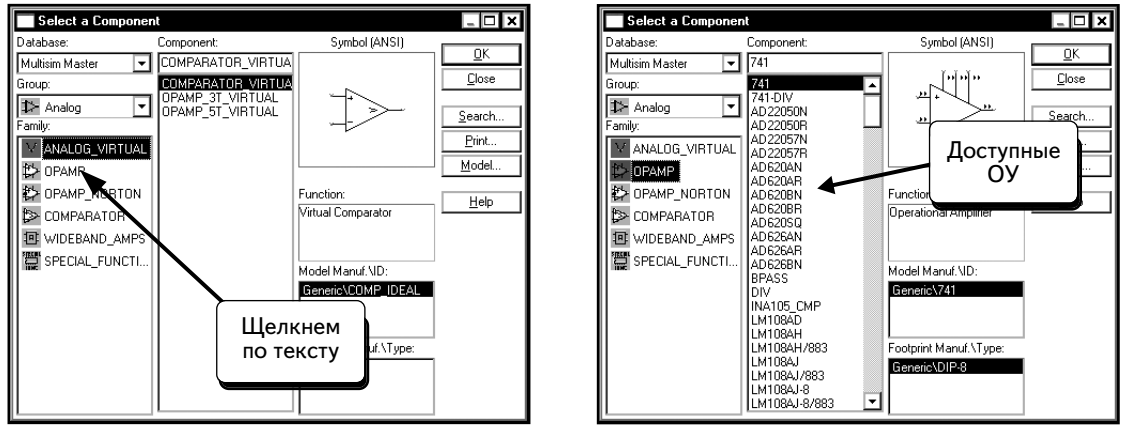


Эта схема содержит несколько, пока незнакомых, компонентов, поэтому расскажем о том, как создать такую схему. Сначала добавим операционный усилитель LM124AJ. Для этого щелкнем по кнопке **Analog (Аналоговые)** , как показано ниже:

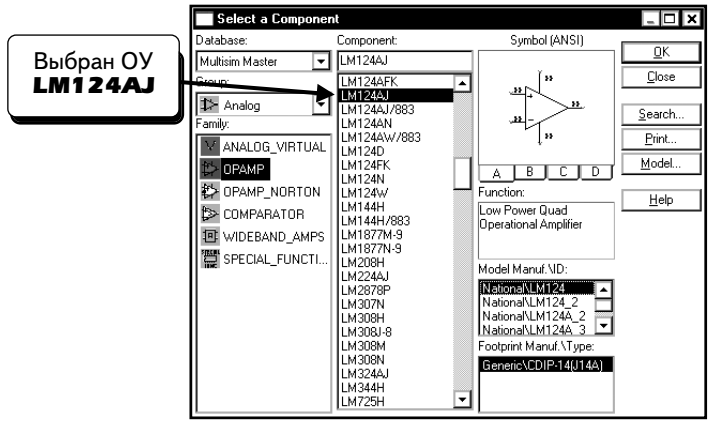




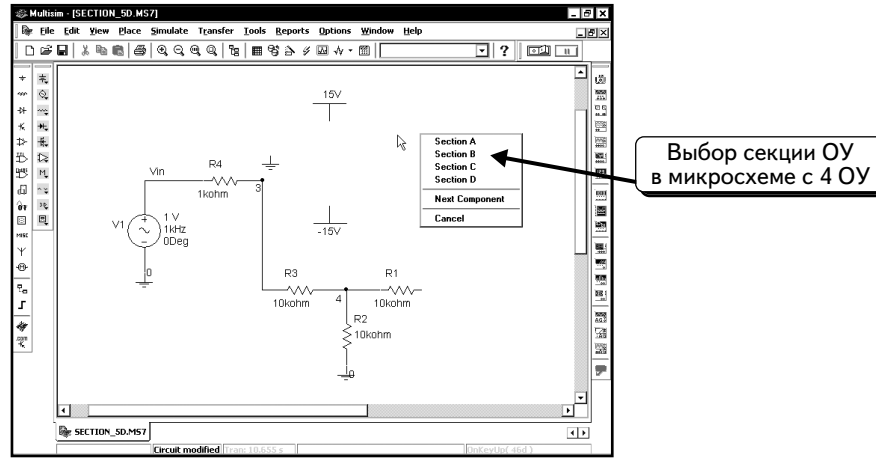
Выберем семейство **OPAMP**, чтобы открыть список доступных компонентов:



Найдем и выделим ОУ **LM124AJ** на панели **Component**:

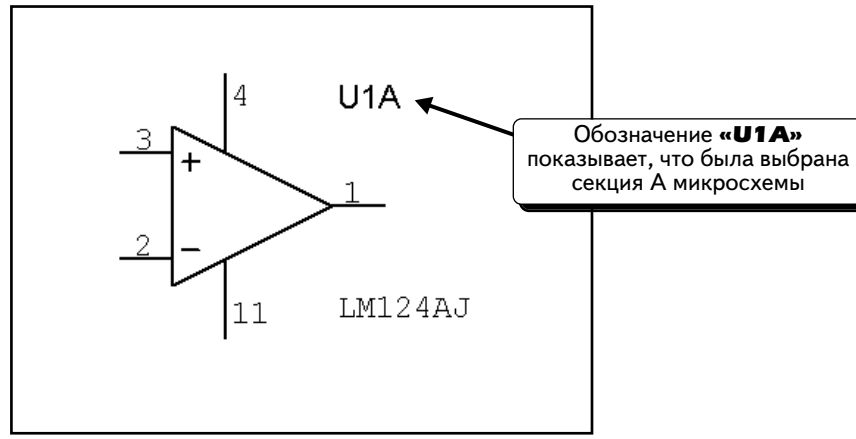


Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент:

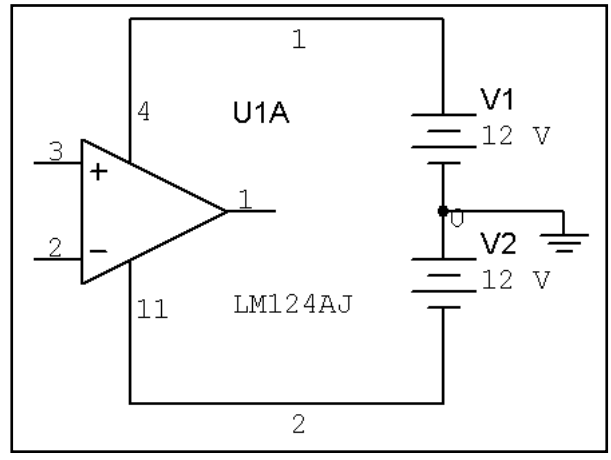


Группа LM124 включает четыре ОУ с суффиксами A, B, C и D.

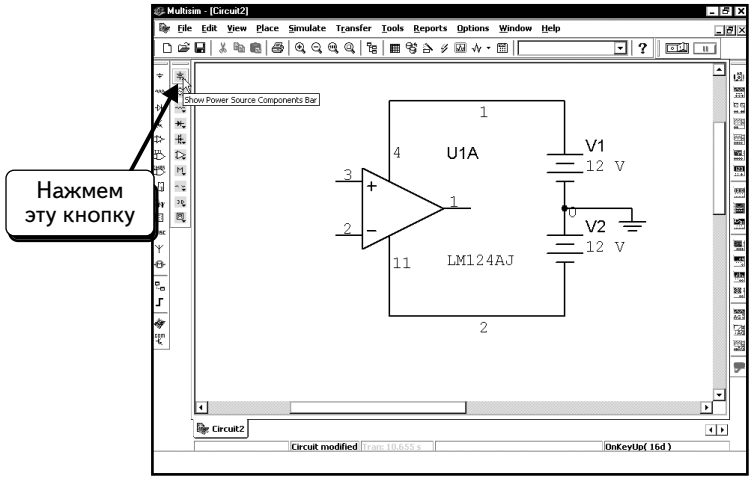
Выбор компонента для модели не имеет значения, поэтому выберем любой компонент из группы и добавим его в схему:

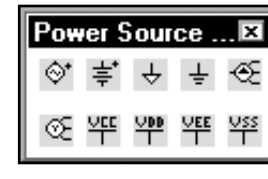


Далее добавим в схему источники постоянного напряжения. Можно использовать стандартные источники постоянного напряжения, как показано ниже. Но мы не советуем вам этого делать:

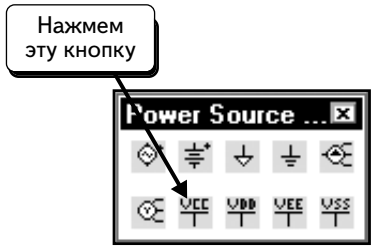


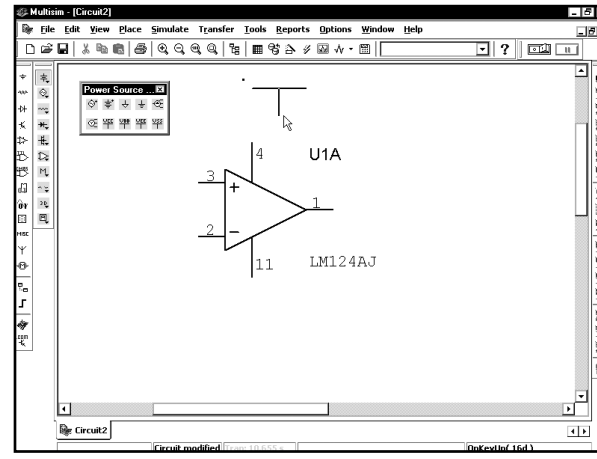
Этот метод работает, но существенно усложняет рисунок. Вместо источников постоянного напряжения добавим компонент, который называется **Vcc**. Закроем панель инструментов с аналоговыми компонентами и нажмем кнопку ***Show Power Source Components Bar*** **(Показать панель компонентов Power Source)** :



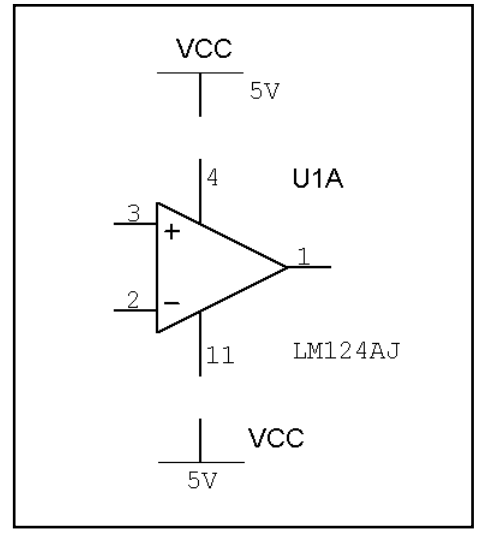


Нажмем кнопку ***Vcc*** , чтобы выбрать компонент:

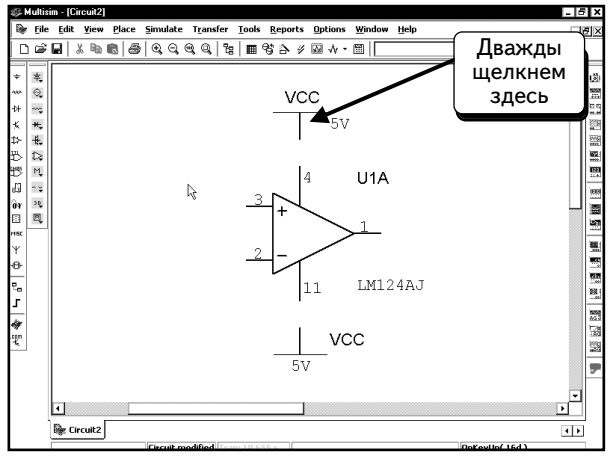


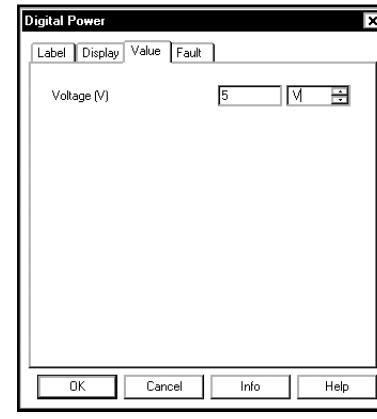


Добавим, как показано, два компонента:

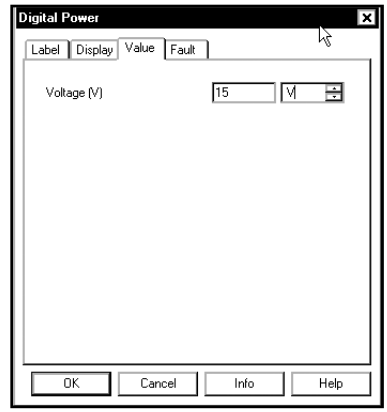


Сначала изменим параметры компонента **Vcc**. Дважды щелкнем по его иконке:

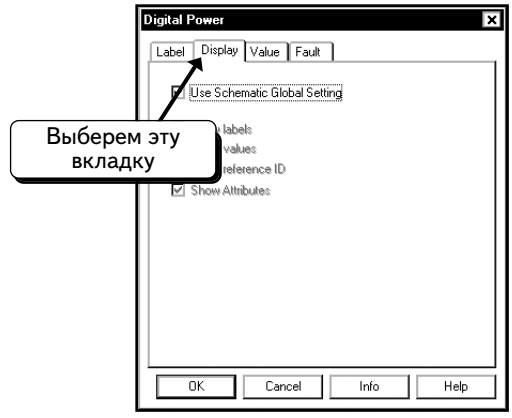




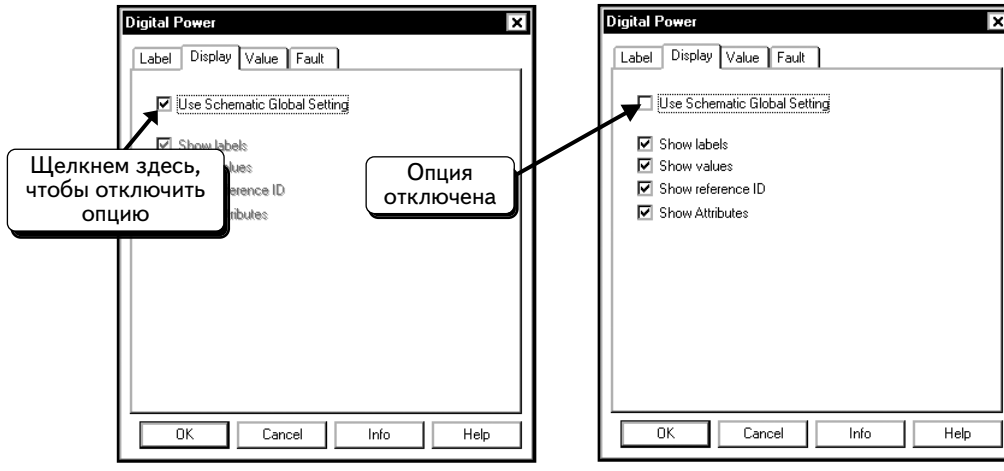
На вкладке **Value** напряжение узла настроено на **5** В. Изменим значение на **15** В:



Затем настроим отображение информации около условного обозначения источника. Щелкнем по вкладке **Display**:

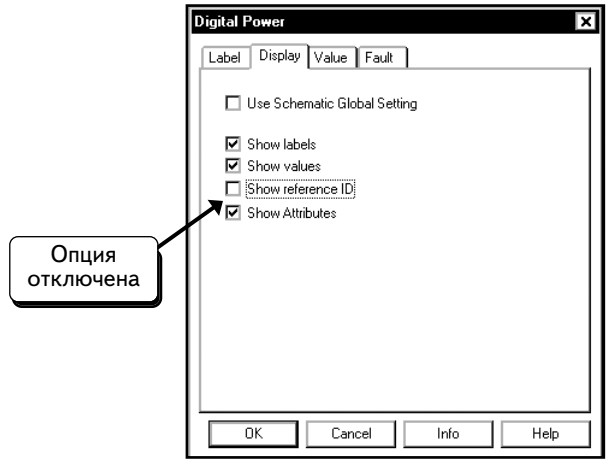


Этот компонент использует настройки Multisim по умолчанию. Отключим эту опцию, как показано ниже:

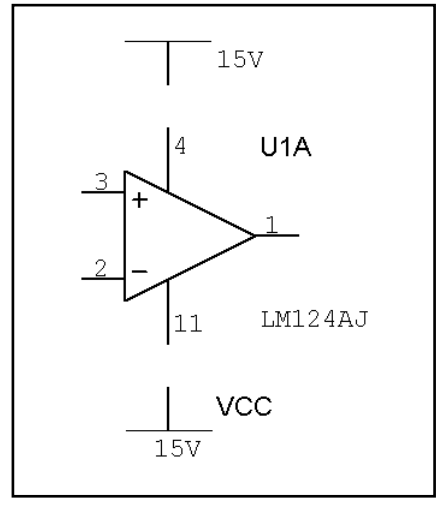


Около источника появились два значения. Первое (**15V**) информирует о напряжении источника. Появление этого значения на схеме управляется с помощью опции **Show values (Показать значения)**. Второе (**VCC**) показывает название компонента. Отображение этого значения управляется с помощью опции **Show reference ID (Показать название)**.

Отключим опцию ***Show reference ID***, чтобы не загромождать схему:

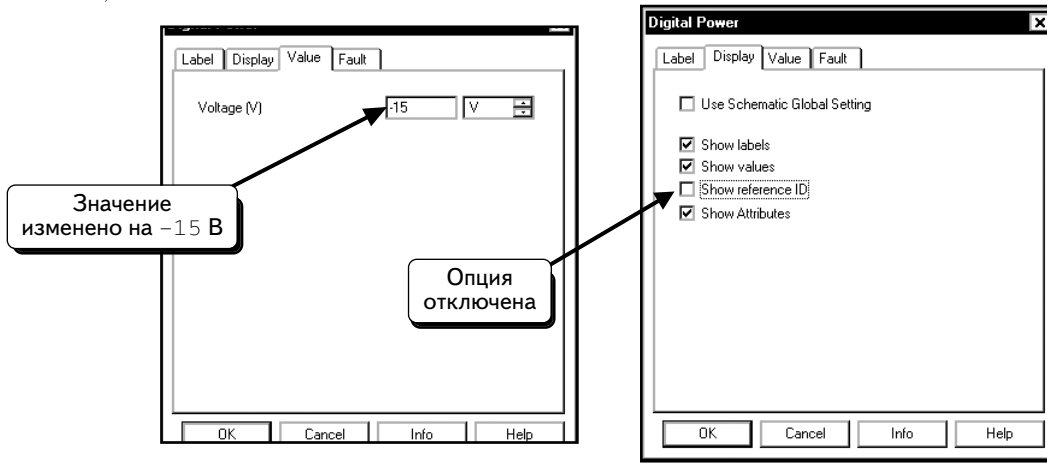


Нажмем кнопку ***OK***, чтобы принять изменения и вернуться к схеме:



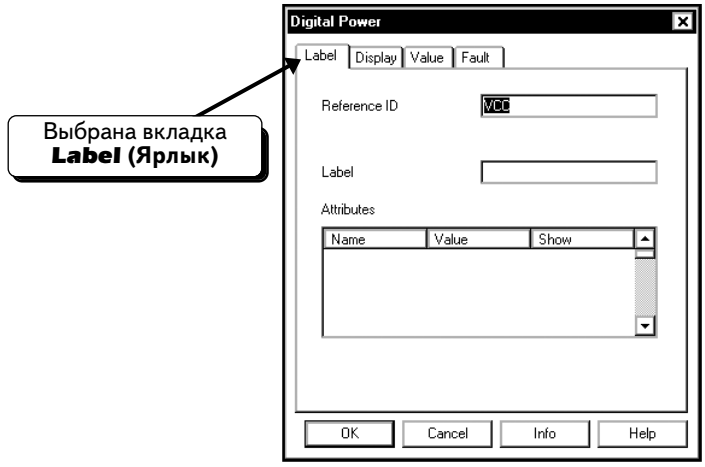
Как видим, название **«VCC»** скрыто, а значение напряжения изменилось на ***15 V***.

Настроим параметры второго компонента ***VCC***. Изменим значение на –15 ***V*** и отключим опцию ***Show reference ID***, как показано ниже:

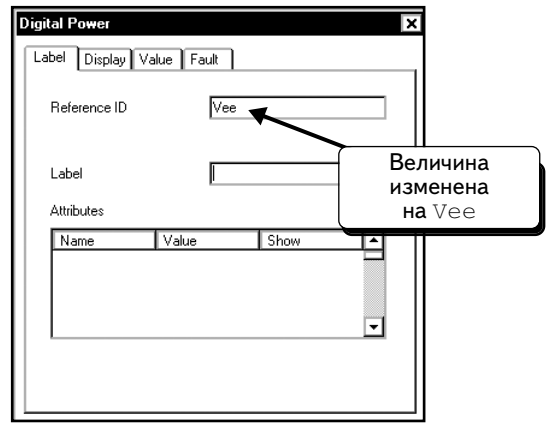


И последнее, нужно изменить название компонента. Если мы этого не сделаем, оба компонента будут иметь одинаковые названия **(VCC)**, что может привести к проблемам.

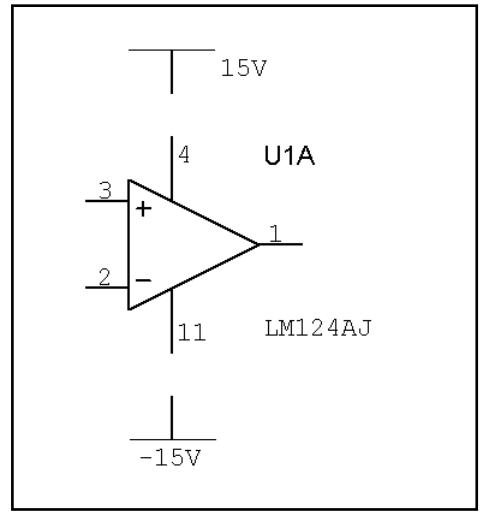
Щелкнем по вкладке **Label**:



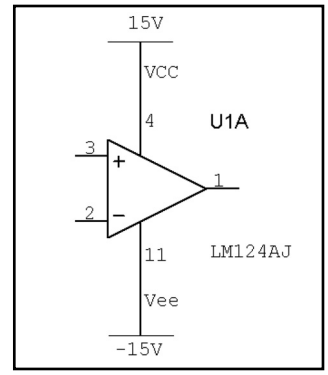
Изменим название компонента на `Vee`:



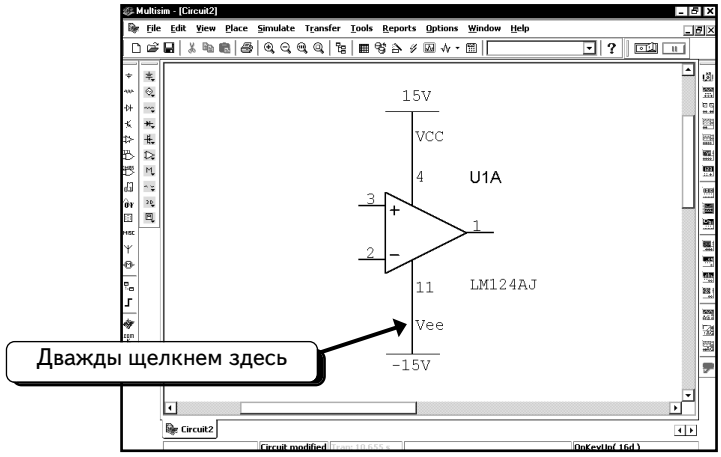
Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения:

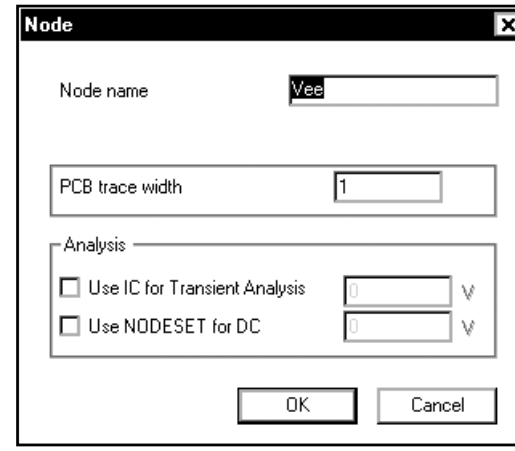


Подключим оба компонента к схеме и переместим текст, чтобы он легче читался:

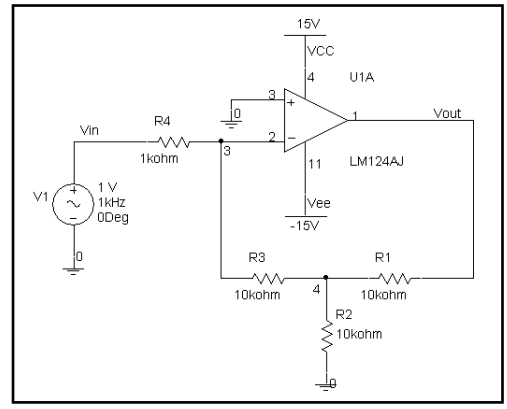


На схеме выше отображены обозначения **VCC** и **Vee**. Причина заключается в том, что была активирована опция, которая показывает названия узлов в схеме. Это упрощает изменение ярлыков узлов. Возможно, у вас эта опция не выбрана, и вы не увидите обозначения **VCC** и **Vee**. Если вы не видите ярлыки, вы можете дважды щелкнуть по проводу и просмотреть свойства. Например, дважды щелкнув по этому проводу, как показано ниже, увидим сведения о нем на экране:





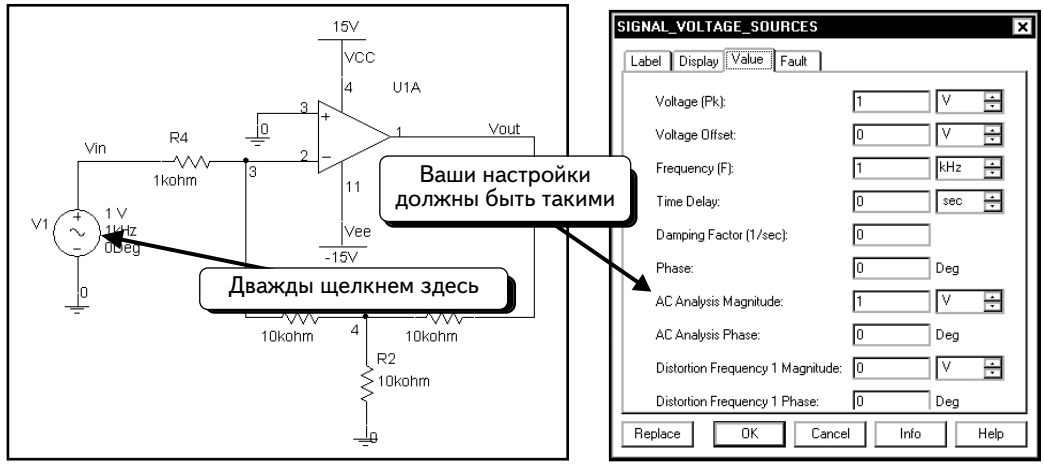
Видим, что узел называется **Vee**. Если в вашей схеме узлы называются одинаково, вам необходимо дважды щелкнуть по одному из них и изменить название. Нажмем кнопку **OK**, чтобы закрыть окно. Завершим создание схемы, как показано:



Определим коэффициент усиления усилителя V_{out}/V_{in}. Так как амплитуда V_{in} составляет 1 В, амплитуда V_{out} равна коэффициенту усиления. Если он равен 200, то амплитуда напряжения на выходе составит 200 В. Это может показаться не совсем правильным, так как источники питания имеют напряжение ±15 В. При выполнении анализа **AC Analysis** определяют рабочие точки для всех нелинейных компонентов, а затем все компоненты заменяют линейными моделями. Так как модели линейные, напряжение и ток в схеме не ограничиваются пара-

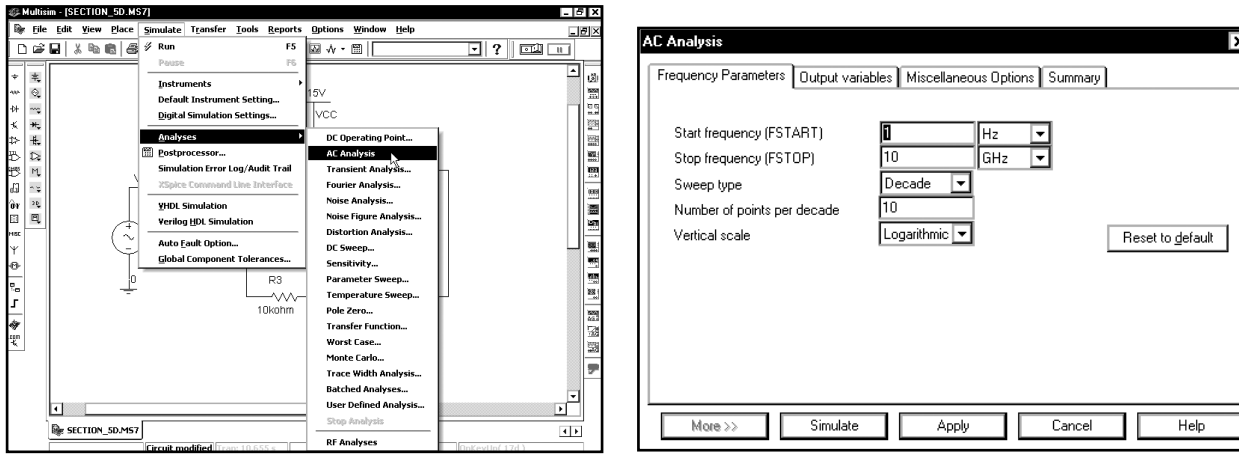
метрами источников постоянного напряжения. Если в линейной схеме входное напряжение 1 В создает выходное напряжение 10 В, то входное напряжение 1 000 000 В будет создавать выходное напряжение 1 0000 000 В. Поэтому амплитуда входного напряжения не имеет значения для измерения коэффициента усиления, и мы выбрали значение 1 В, чтобы упростить работу. Для модели переменного тока амплитуда 200 В — это вполне стандартное значение. ОУ не сможет обеспечить такую амплитуду, но можно использовать данное значение при расчете усиления с помощью функции **AC Analysis**. Если необходимо определить максимальное выходное напряжение схемы, то придется воспользоваться анализом во временной области. Пример расчета размаха напряжения транзисторного усилителя показан в разделе 6.8 на с. 392. С помощью данной методики можно определить и размах напряжения в схеме с ОУ.

Зададим параметры источника переменного напряжения для функции **AC Analysis**. Дважды щелкнем по источнику. Изменим значение параметра ***AC Analysis Magnitude*** **(Амплитуда анализа переменного тока)** на 1 В, а значение параметра ***AC Analysis Phase*** **(Фаза анализа переменного тока)** — на 0. Настройки в вашем диалоговом окне должны соответствовать настройкам, показанным ниже:



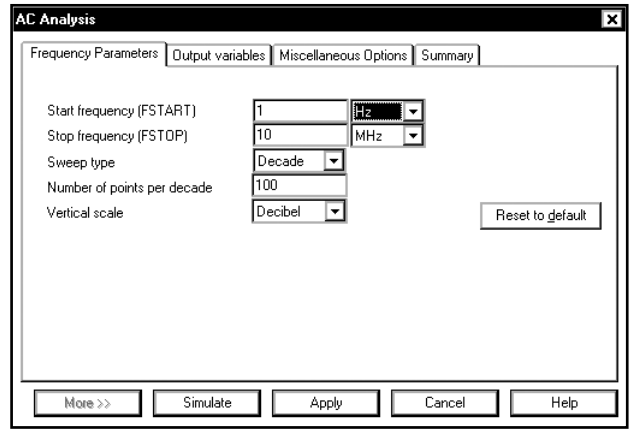
Выбранные параметры указывают, что источник будет использоваться при анализе переменного тока и будет иметь модуль 1 В и фазу 0°. Это — настройки по умолчанию. Проверьте их перед выполнением анализа. Мы не будем работать с анализом искажений, поэтому другие настройки в этом окне для нас не имеют значения. Нажмем кнопку **OK**, чтобы вернуться к схеме.

Настроим параметры моделирования. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Analyses ⇒ AC Analysis:**

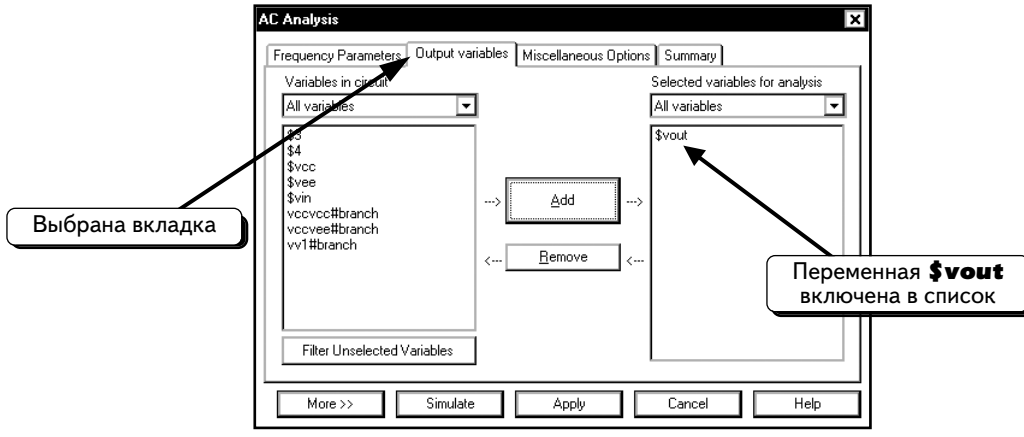


Мы будем моделировать схему в диапазоне частот от 1 Гц до 10 МГц. Так как ширина частотного диапазона составляет несколько декад, выберем тип анализа ***Decade Sweep*** **(Вариация по декадам)** и для графика шаг 100 точек на декаду.

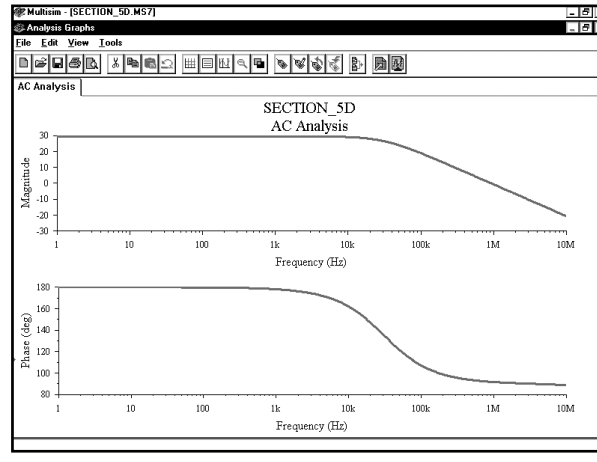
Для графика Боде отобразим ось y в децибелах, поэтому настроим опцию **Vertical Scale** на **Decibel**:



Теперь выберем переменную для графика. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выберем переменную **$vout**:

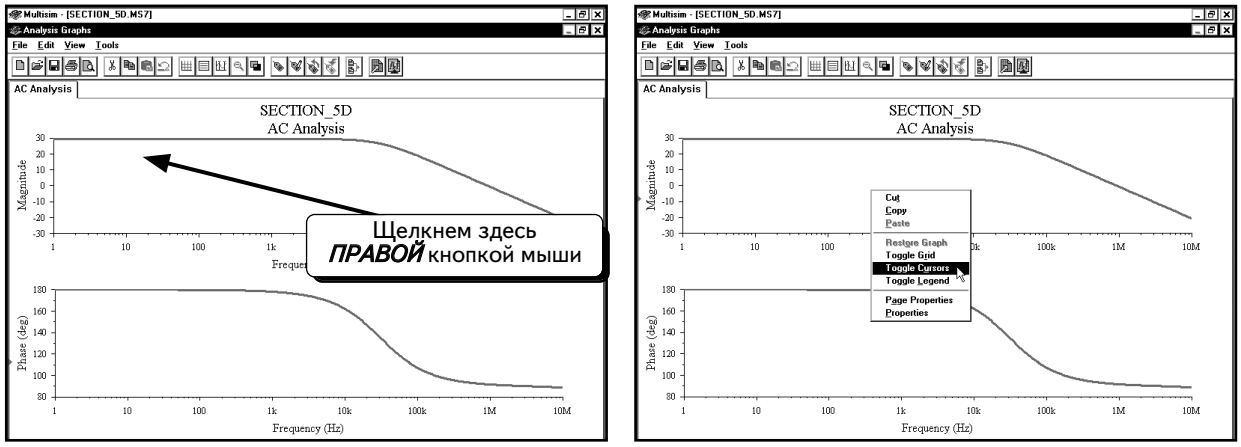


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Появится следующий экран:

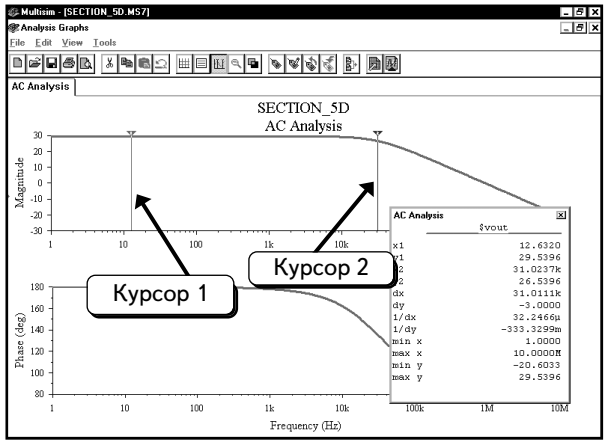


Воспользуемся курсорами, чтобы определить коэффициент усиления и верхнюю граничную частоту –3 дБ.

Щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по верхнему графику и выберем пункт **Toggle Cursors**:



С помощью курсора 1 определим усиление на низких частотах, а с помощью курсора 2 — верхнюю граничную частоту, при которой происходит снижение на –3 дБ:



AC Analysis

	$vout
x1	12.6320
y1	29.5396
x2	31.0237k
y2	26.5396
dx	31.0111k
dy	-3.0000
1/dx	32.2466µ
1/dy	-333.3299m
min x	1.0000
max x	10.0000M
min y	-20.6033
max y	29.5396

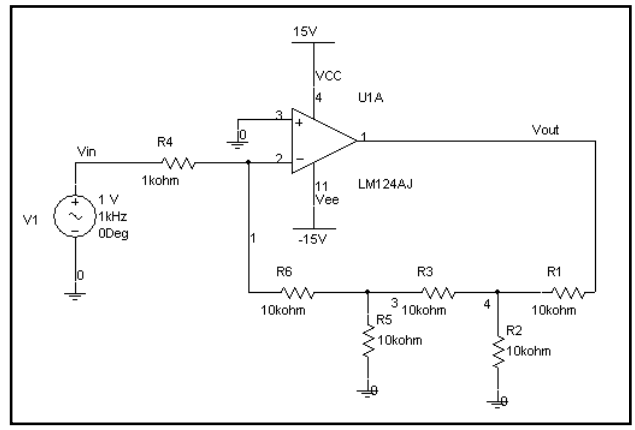
Координата **y1** показывает, что усиление в точке, отмеченной курсором 1, равно **29,5396** дБ (или примерно 30 дБ). **dy** — это разность между ординатами курсоров 1 и 2. Таким образом, если **dy** = –3, то, усиление, соответствующее курсору 2, на 3 дБ меньше, чем усиление, соответствующее курсору 1. Координата **x2** показывает, что частота 3 дБ составляет **31,0237 к**Гц.

Мы знаем, что коэффициент усиления в середине полосы пропускания составляет 30 дБ, а граничная частота –3 дБ равна 31,0237 кГц. Произведение полосы пропускания на коэффициент усиления на средней частоте, характеризующее качество усилителя, равно:

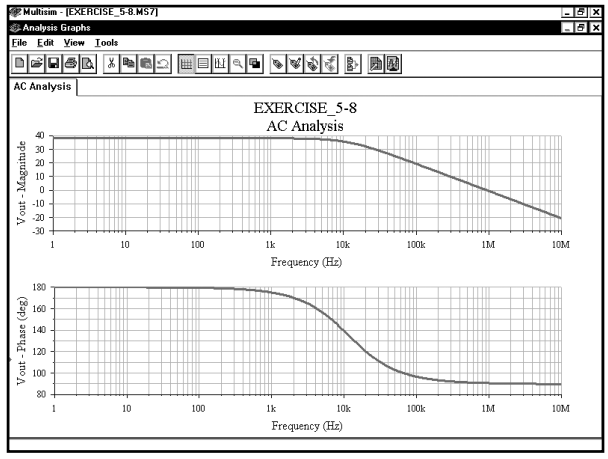
$$GBW = (30)(31{,}024\ \text{кГц}) = 930{,}720\ \text{Гц}.$$

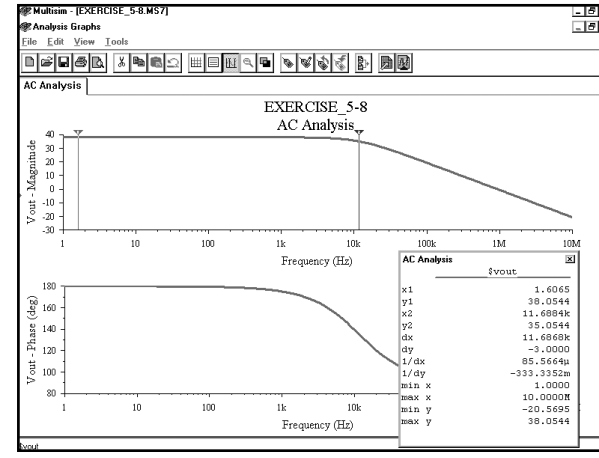
Полученное значение соответствует значению GBW = 1МГц, приведенному в справочных данных на микросхему LM124.

УПРАЖНЕНИЕ 5-8: Определите коэффициент усиления на средней частоте и верхнюю граничную частоту –3 дБ для усилителя. Используя полученные результаты, вычислите значение GBW:



РЕШЕНИЕ:





AC Analysis

	$vout
x1	1.6065
y1	38.0544
x2	11.6884k
y2	35.0544
dx	11.6868k
dy	-3.0000
1/dx	85.5664µ
1/dy	-333.3352m
min x	1.0000
max x	10.0000M
min y	-20.5695
max y	38.0544

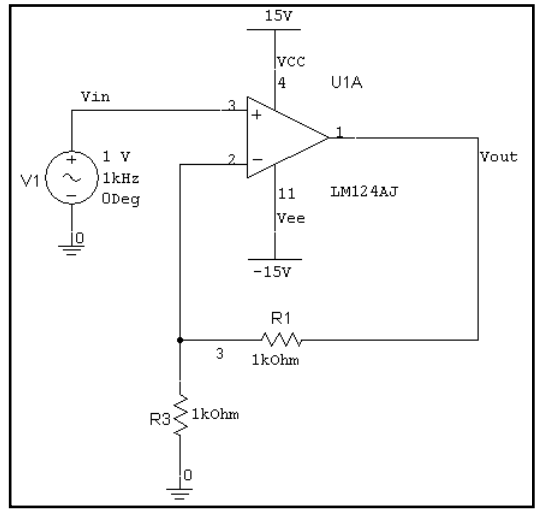
Коэффициент усиления на средней частоте составляет **38,0544** дБ; это значение соответствует расчетному значению 79,932. Верхняя граничная частота по уровню –3 дБ равна **11,6884 к**Гц. Произведение полосы пропускания на коэффициент усиления на средней частоте равно:

$$GBW = (79{,}932)(11{,}6884 \text{ кГц}) = 934{,}277 \text{ Гц}.$$

Это значение очень близко к значению, полученному в предыдущем примере. Причина заключается в том, что параметр GBW является постоянным для всех цепей, содержащих ОУ.

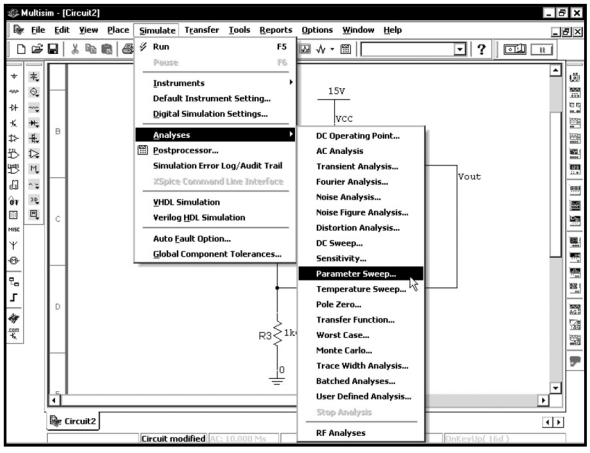
5.5. Вариация параметров. Полоса пропускания ОУ

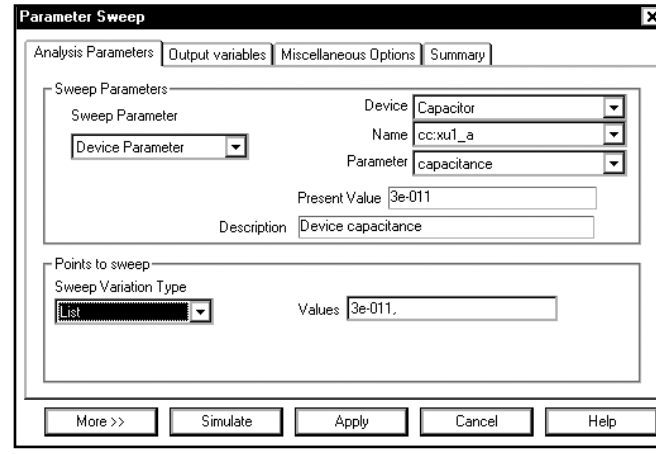
В этом разделе будут использованы возможности программы Multisim, чтобы определить полосу пропускания схемы на ОУ при различных уровнях отрицательной обратной связи. В схемах с ОУ произведение полосы пропускания на коэффициент усиления на средней частоте является постоянным значением. В качестве примера создадим модель, которая формирует график Боде для нескольких значений коэффициента усиления. Используем следующую схему:



Эта схема использует модель ОУ **LM124AJ**. Для всех моделей существующих ОУ задаются ток и напряжение смещения, ограничения по нарастанию напряжения (slew rate limitations), а также ограничения по частоте. Такие модели требуют наличия источников питания, без которых они не смогут функционировать.

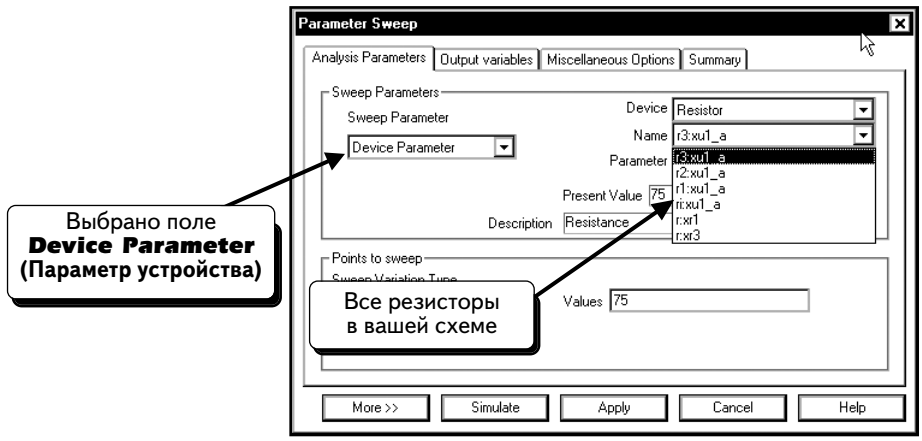
Мы хотим настроить частотную характеристику схемы с ОУ на различные значения по усилению, поэтому должны выбрать опцию **Parameter Sweep (Вариация с изменением параметров)**, а также изменить тип анализа на **AC Analysis**. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Parameter Sweep (Моделировать ⇒ Анализы ⇒ Вариация с изменением параметров)**:



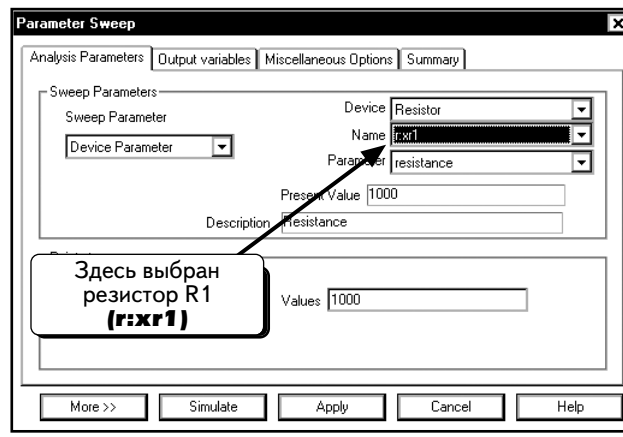


Поле **Sweep Parameter** может быть настроено на **Device Parameter (Параметр устройства)** или **Model Parameter (Параметр модели)**. Параметрами устройства могут быть сопротивление резистора, индуктивность катушки, температурный коэффициент конденсатора и так далее. Параметрами модели являются параметры модели диода или транзистора. В качестве примера можно привести напряжение зенеровского пробоя для диода (параметр модели BV) или усиление по току транзистора BJT (параметр модели BF).

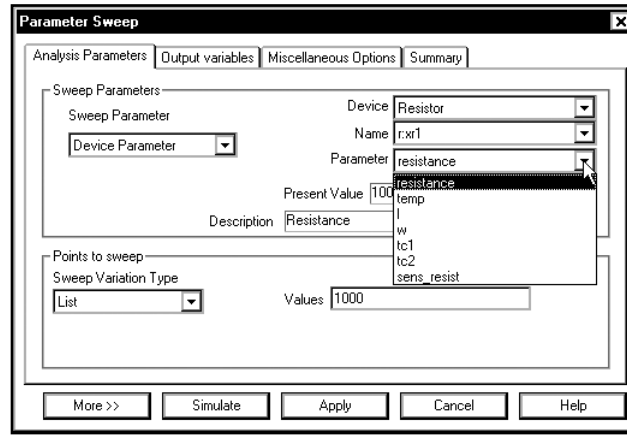
Мы хотим получить семейство частотных характеристик схемы с ОУ при различных значениях коэффициента усиления. Он равен 1 + (R_1 / R_3); следовательно, можно изменить усиление путем изменения значений R_1 или R_3. Воспользуемся опцией **Parameter Sweep**, чтобы изменять сопротивление R1. Сопротивление резистора является параметром компонента, значит, опция **Sweep Parameter** должна быть настроена на **Device Parameter,** как показано ниже, включая диоды, транзисторы, конденсаторы и резисторы. Выберем пункт **Resistor Device (Резистор)**. После этого все доступные резисторы отобразятся в поле **Name**:



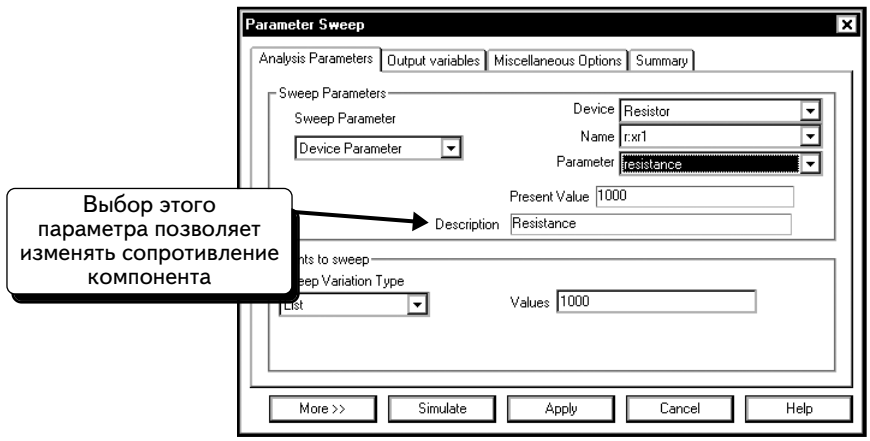
В ниспадающем меню намного больше резисторов, чем на схеме. Это вызвано тем, что в список включены резисторы, которые используются в подсхеме ОУ. Резисторы с обозначением **xu1_a** входят в подсхему ОУ (так как в схеме компонент ОУ помечен как U1A). Два внешних резистора в схеме, **R1** и **R3,** обозначены в списке как **r:xr1** и **r:xr3**. Выберем резистор **r:xr1**:



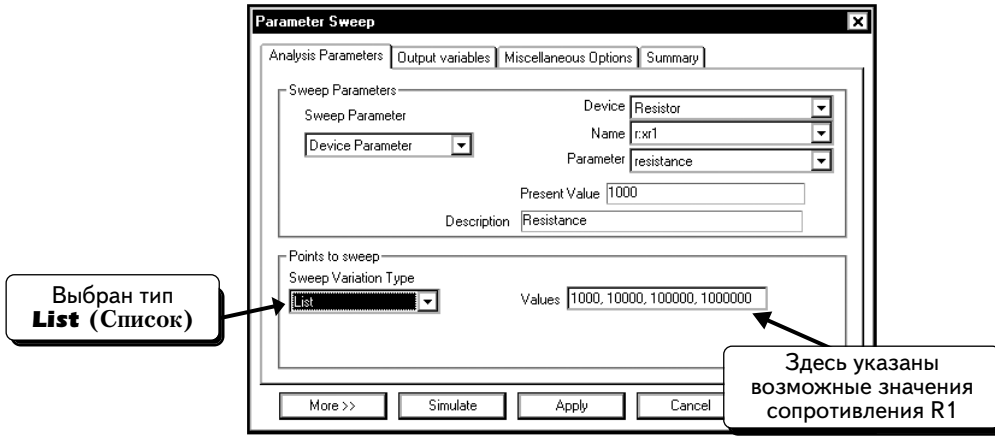
Далее мы выберем параметр резистора для изменения из списка параметров, указанных в поле **Parameter**:



Как видите, можно изменять рабочую температуру резистора (**temp**), длину и ширину (**l** и **w** — эти параметры используются для пленочных резисторов, встроенных в интегральные схемы), а также другие параметры. Необходимо изменить сопротивление, поэтому выберем параметр **Resistance (Сопротивление)**. В поле **Description (Описание)** появится описание выбранного параметра:



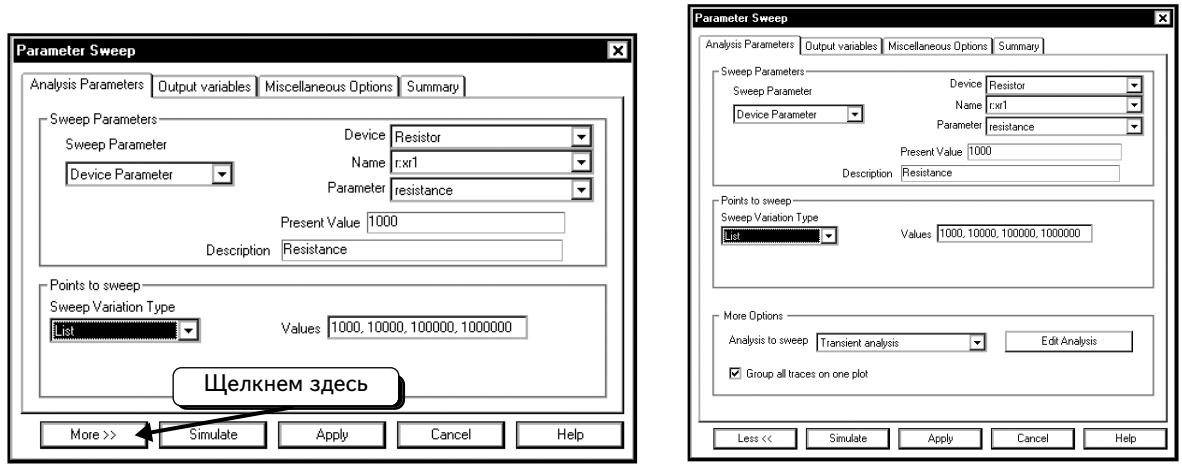
Укажем значения для параметра R1. Воспользуемся опцией **List Sweep Variation Type (Показать варианты значений)** и выберем значения 1 000, 10 000, 100 000 и 1 000 000. Значения разделяются запятыми:



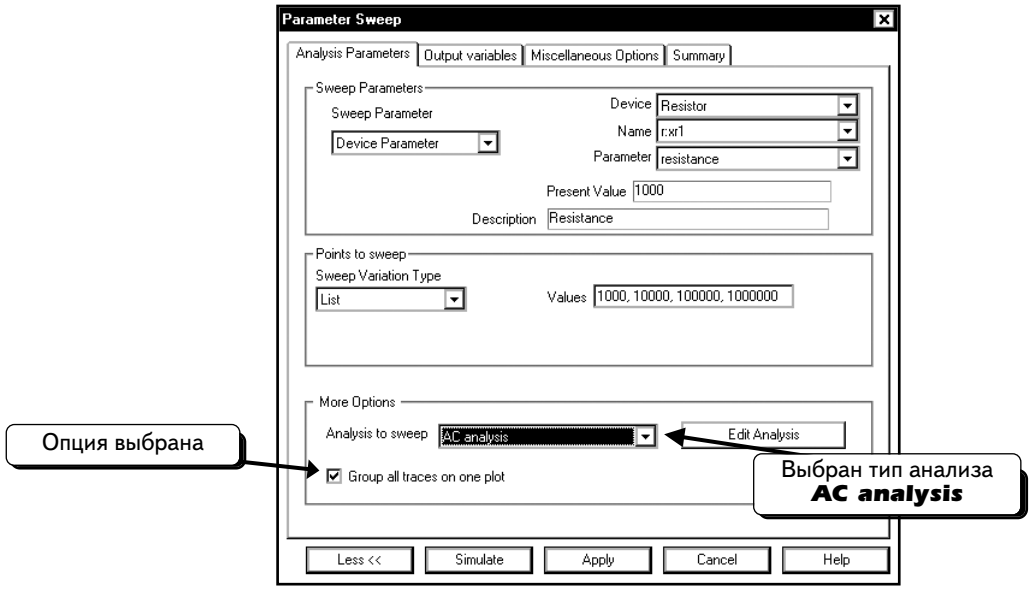
Заметим, что можно настроить значения для резистора R1 и с помощью опции Decade **Sweep Variation Type**.

Теперь настройка опции **Parameter Sweep** завершена. Далее нужно указать, что опция **Parameter Sweep** должна действовать совместно с функцией **AC Analysis**.

Нажмем кнопку **More (Далее)**:

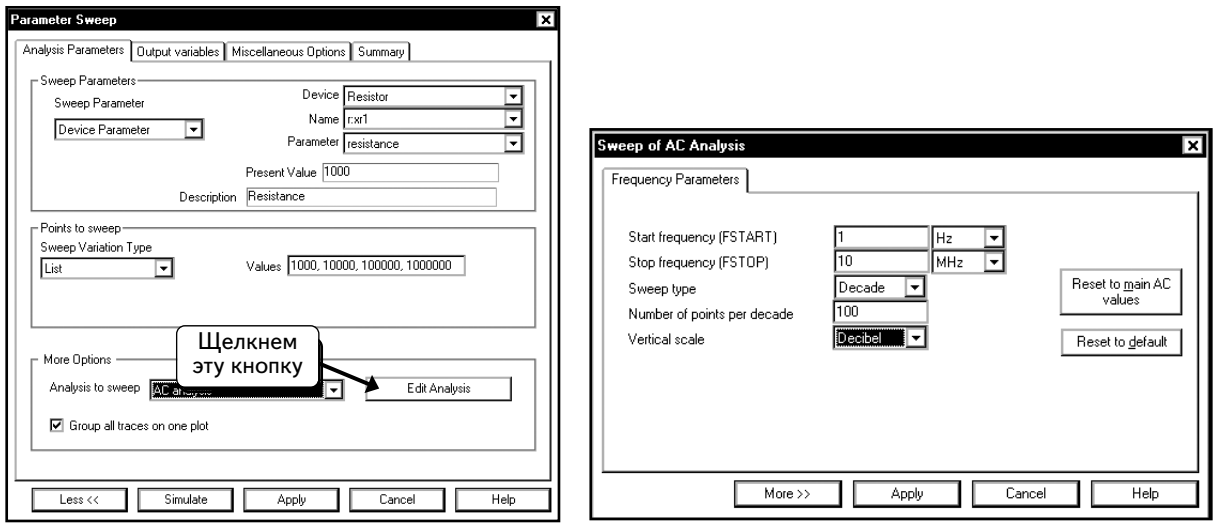


По умолчанию опция ***Analysis to sweep* (Анализ для вариации)** настраивается на ***Transient analysis* (Анализ переходных процессов)**. Чтобы вычислить частотную характеристику, необходимо выполнить другой анализ: ***AC analysis* (Анализ на переменном токе)**. Выберем опцию ***AC analysis***, а также ***Group all traces on one plot* (Сгруппировать все кривые на одном графике)**. Этот выбор позволит отобразить все результаты изменений параметров на одном графике. Выберем опции так, как показано ниже:

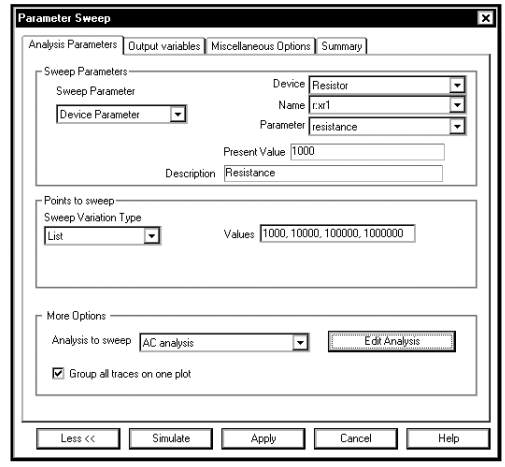


Далее настроим параметры функции ***AC analysis***. Нажмем кнопку ***Edit Analysis* (Редактировать параметры анализа)** и настроим параметры, как показано ниже.

Эти настройки аналогичны тем, которые мы выбирали в разделе 5.5:

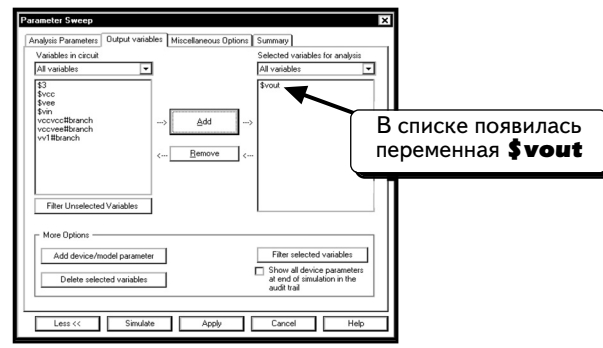


Нажмем кнопку **Apply (Применить)**, чтобы вернуться в диалоговое окно **Parameter Sweep:**

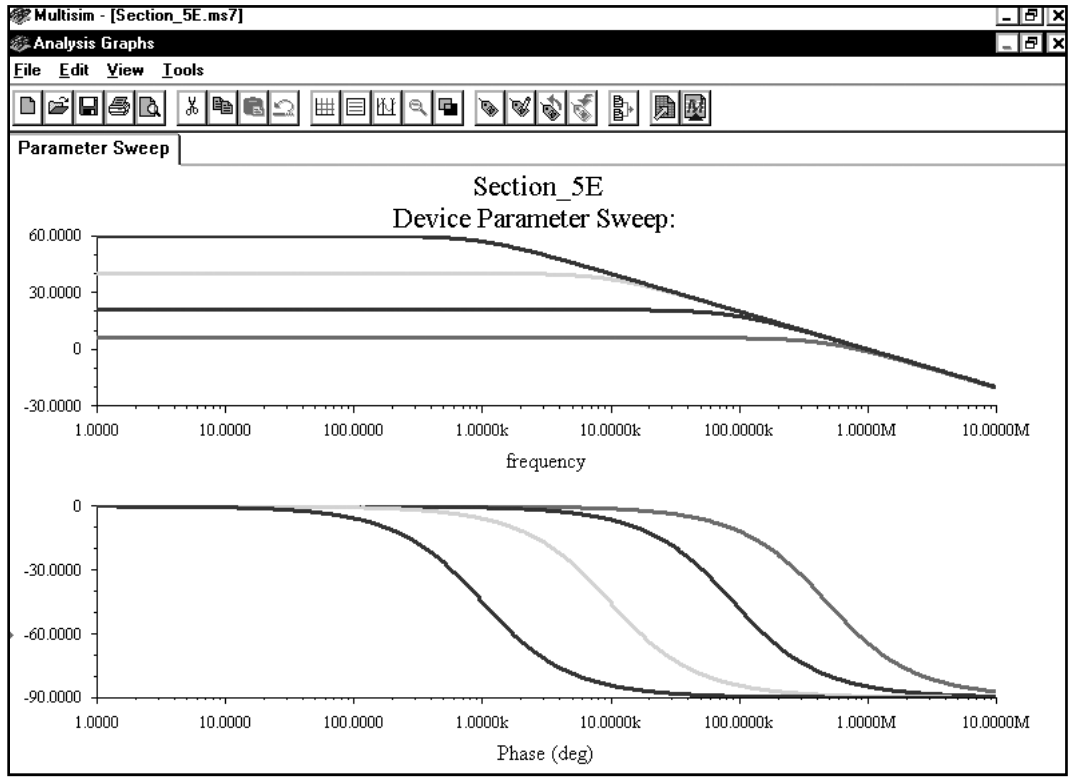


Создадим следующую модель. Сначала сопротивление резистора R1 будет равно 1000 Ом, а функция **AC Analysis** выполнит изменение частоты от 1 Гц до 10 МГц. Затем сопротивление резистора R1 будет равно 10 000 Ом, а функция **AC Analysis** выполнит изменение частоты от 1 Гц до 10 МГц. Затем сопротивление резистора R1 будет равно 100 000 Ом, а функция **AC Analysis** выполнит изменение частоты от 1 Гц до 10 МГц. И наконец, сопротивление резистора R1 будет равно 1 000 000 Ом, а функция **AC Analysis** выполнит изменение частоты от 1 Гц до 10 МГц. Рассмотрим результаты всех измерений, отображенные на одном графике.

Укажем данные для графика. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выберем переменную **$vout:**



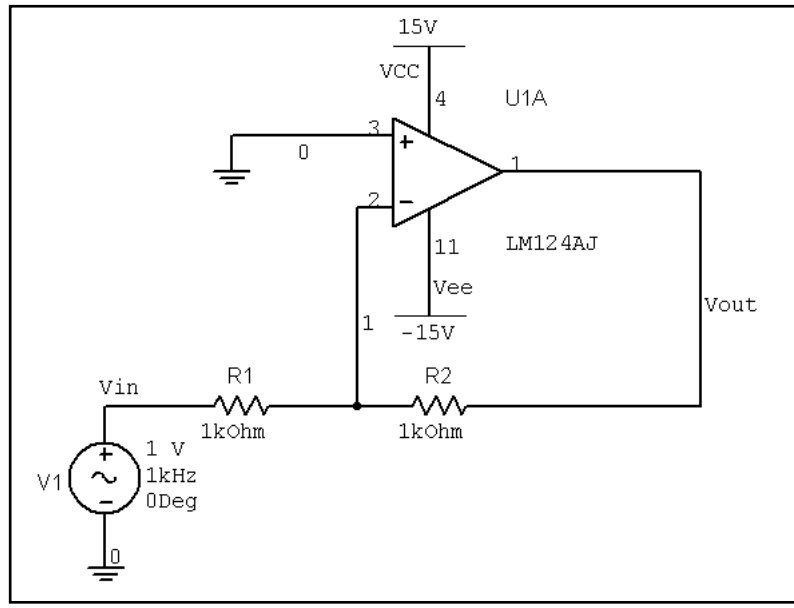
Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:



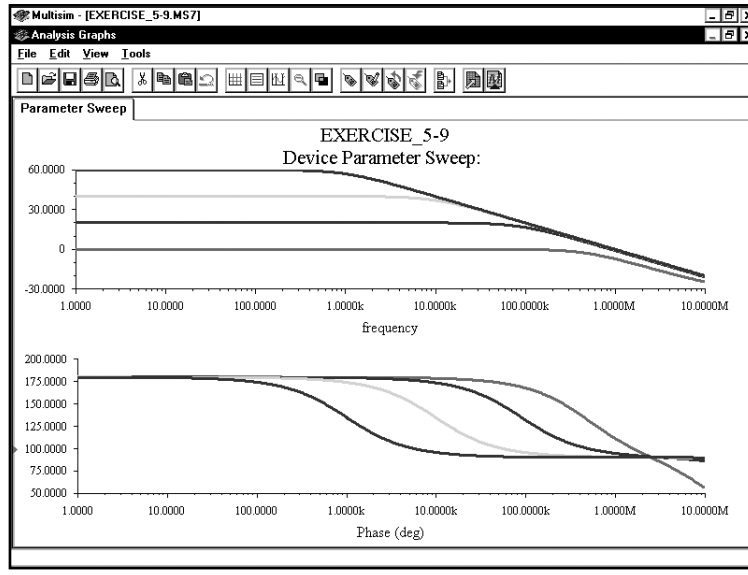
Верхний график показывает зависимость коэффициента усиления, выраженного в децибелах, от частоты. Видно, что коэффициент усиления повышается при уменьшении частоты. С помощью курсоров определяем, что при усилении в 60 дБ (1000) верхнее граничное значение для ослабления (–3 дБ) составляет 1 кГц. Это соответствует значению GBW в 1 МГц (1000 умножить на 1000). При усилении в 40 дБ (100) верхнее значение по частоте (–3 дБ) составляет 10 кГц. Это тоже соответствует GBW в 1 МГц (100 умножить на 10 000). При усилении в 20 дБ(10) верхняя предельная частота (–3 дБ) составляет 91,2 кГц. Это соответствует GBW в 912 кГц (91,200 умножить на 10). При усилении в 3 дБ (в 2 раза) верхнее значение по частоте (–3 дБ) составляет 490 кГц. Это соответствует GBW в 980 кГц (2 умножить на 490,000).

Как видим, для всех значений коэффициента усиления пропускная способность является постоянной величиной. Это значит, что в схемах с ОУ усиление будет увеличиваться при уменьшении полосы пропускания и наоборот. Кроме того, можно пожертвовать усилением, чтобы увеличить полосу пропускания схемы с ОУ. Изменяя коэффициент усиления, изменяем также и полосу пропускания.

УПРАЖНЕНИЕ 5-9: В схеме инвертирующего усилителя с ОУ определите верхнюю граничную частоту –3 дБ для коэффициентов усиления на средних частотах –1, –10, –100 и –1000. Покажите, что (за исключением усиления –1), произведение полосы пропускания на коэффициент усиления на средней частоте GBW является постоянной величиной. Эта схема с коэффициэнтом усиления –1 представляет собой один из редких примеров схемы, в которой данная величина отличается от значения на других частотах:



РЕШЕНИЕ: Воспользуйтесь опцией Parameter Sweep и функцией AC Analysis:



5.6. Мощность переменного тока и коррекция коэффициента мощности

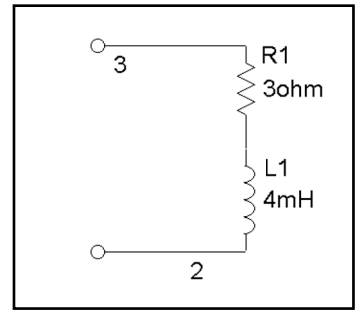
С помощью ваттметра **Wattmeter** программы Multisim можно измерить мощность переменного тока, рассеваемую в нагрузке, и коэффициент мощности (power factor). Используя эту функцию, измеряют мощность переменного или постоянного тока. В разделе 3.1.3 было показано, как применять ваттметр для измерения мощности, рассеваемой резистором, в схеме с источниками постоянного тока (DC). Здесь будет показано, как с ее помощью рассчитать мощность, рассеваемую в нагрузке, и коэффициент мощности нагрузки.

Все линейные нагрузки могут быть сведены к одному сопротивлению Z_{Load}, где Z_{Load} выражается комплексным числом с помощью модуля и фазы: $Z_{Load} = Z_L \angle \theta_L$, либо с помощью действительной и мнимой частей $Z_{Load} = A + jB$. В схеме переменного тока мощность, рассеиваемая нагрузкой, выражается как

$$P_{Load} = (V_M I_M/2)\cos(\theta_L) = V_{RMS} I_{RMS}\cos(\theta_L),$$

где V_M и I_M — это максимальные значения напряжения и тока нагрузки, а V_{RMS} и I_{RMS} — действующие значения этих же величин; величина θ_L — это фазовый угол нагрузки, то есть угол между напряжением и током нагрузки; величина $\cos(\theta_L)$ называется коэффициентом мощности (PF) и показывает соотношение активной и реактивной мощностей нагрузки. Ваттметр измеряет активную мощность переменного тока, рассеиваемую нагрузкой, и коэффициент мощности.

В качестве примера рассчитаем мощность, рассеваемую нагрузкой в следующей схеме:



Предположим, что эта нагрузка подключена к схеме переменного тока, действующее напряжение которой составляет 115 В при частоте 60 Гц. Сопротивление нагрузки при частоте 60 Гц равно:

$$Z_{Load} = R_1 + j\omega L_1 = 3\ \text{Ом} + j(2\pi 60\ \text{Гц})(0{,}004\ \text{Гн}) = (3 + j1{,}508)\text{Ом} = (3{,}358\angle 26{,}687^\circ)\text{Ом}.$$

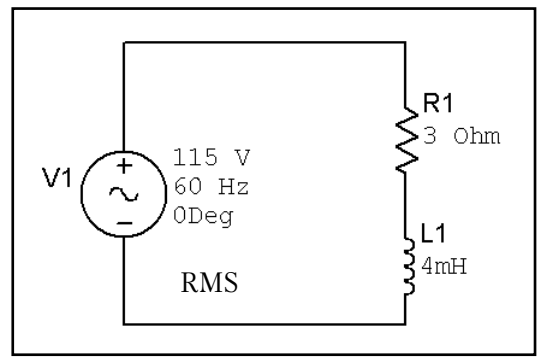
Если нагрузка подключена к схеме с действующим напряжением 115 В, рассеиваемая ею мощность составит:

$$P_{Load} = V_{RMS} I_{RMS}\cos(\theta_L) = V_{RMS}(V_{RMS}/|Z_{Load}|)\cos(\theta_L) = [(115\ \text{В})^2 / 3{,}358\ \text{Ом}]\cos(26{,}687^\circ) = 3{,}519\ \text{кВт}.$$

Коэффициент мощности равен:

$$PF = \cos(\theta_L) = \cos(26{,}687^\circ) = 0{,}893.$$

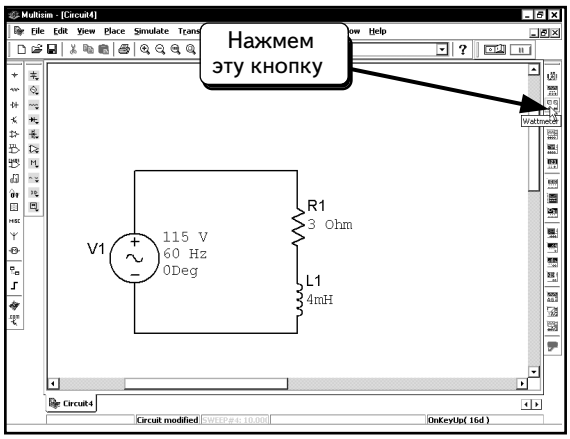
Выполнив аналитический расчет, можем сравнить его результаты с результатами моделирования в Multisim. Измерим, как показано, мощность, рассеиваемую нагрузкой при ее подключении к схеме с действующим напряжением 115 В:

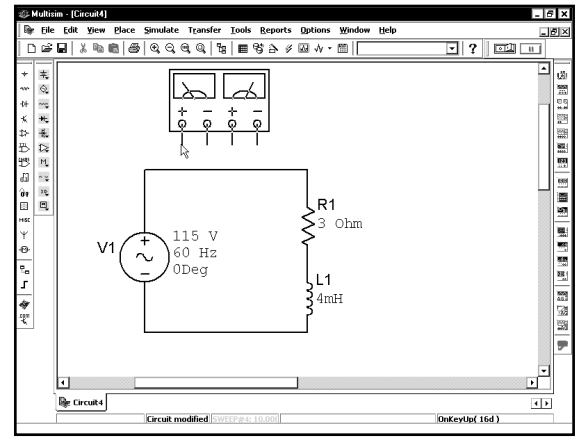


В схеме используется питающий (а не сигнальный) источник напряжения, поэтому модуль напряжения является действующем значением. С помощью функции ваттметра измерим мощность, рассеиваемую нагрузкой при подключении к источнику напряжения. Ваттметр измеряет ток и напряжение на нагрузке, рассеиваемую мощность и коэффициент мощности.

Чтобы включить в схему ваттметр, щелкнем кнопку **Wattmeter** на панели инструментов **Instruments**.

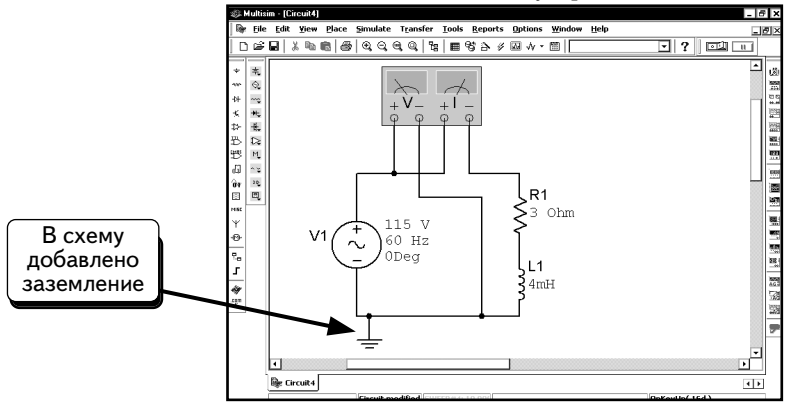
Ваттметр будет «привязан» к курсору мыши:





Включим ваттметр в эту схему.

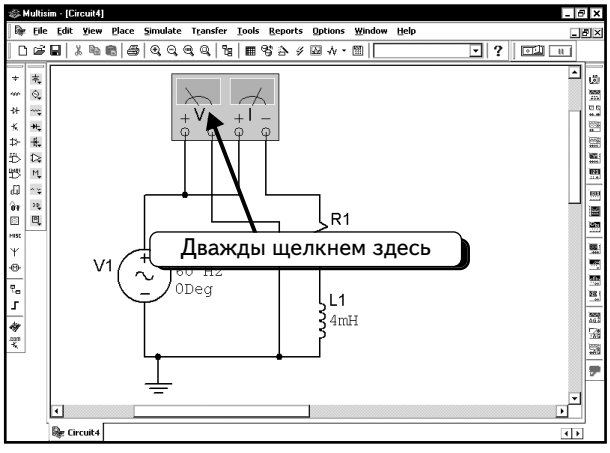
Чтобы измерить рассеиваемую нагрузкой мощность, нужно измерить ток и напряжение нагрузки. Ваттметр измеряет ток так же, как мультиметр или индикатор тока; если ток входит в «плюс» и выходит из «минуса», индикатор будет показывать положительное значение. Подключим устройство так, как показано ниже:

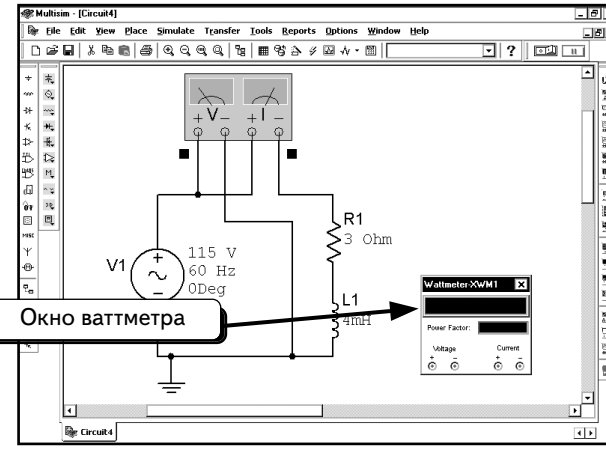


Как видно из схемы, устройство измеряет напряжение на верхнем полюсе нагрузки как положительное, а напряжение на нижнем полюсе нагрузки — как отрицательное. Ток, входящий в верхний полюс нагрузки измеряется как положительный. Таким образом, положительным является направление, при котором ток входит в «плюс» нагрузки. Помните о том, что уравнение мощности: $P_{Load} = V_{RMS}I_{RMS}\cos(\theta_L)$, применимо только в том случае, если вы следуете принципу, при котором положительный ток входит в «плюс».

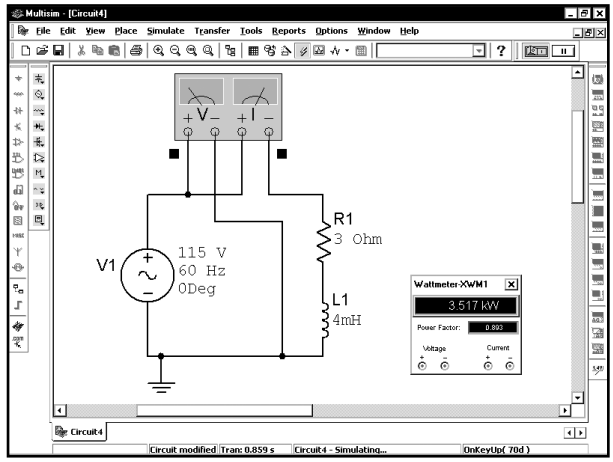
Заметим, что к схеме вверху было подключено заземление. Для реальной схемы наличие заземления не обязательно, но программа Multisim и анализ SPICE требуют, чтобы схема была заземлена. Если не заземлить схему, то увидим сообщение об ошибке.

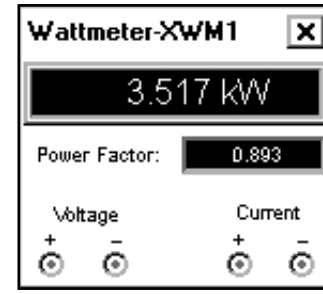
Дважды щелкнем по ваттметру, чтобы открыть его окно:





Приступим к моделированию. Для этого выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Run**, нажмем клавишу F5 или кнопку ***Run/stop simulation*** :





Как видим, нагрузка рассеивает мощность **3,517 kW (кВт)**, а коэффициент мощности равен **0,893**, и эти значения соответствуют расчетным.

5.6.1. Коррекция коэффициента мощности

Определив рассеиваемую нагрузкой мощность и коэффициент мощности с помощью расчетов и модели, можно выполнить коррекцию коэффициента мощности. Основная идея коррекции заключается в том, чтобы последовательно с нагрузкой или параллельно ей подключить реактивный компонент для компенсации реактивной мощности. Компенсированная нагрузка будет при этом восприниматься источником как чисто активная, а коэффициент мощности чисто активной нагрузки равен 1. Для примера, который был рассмотрен в предыдущем разделе, самый простой способ коррекции коэффициента мощности состоит в том, чтобы подключить параллельно нагрузке конденсатор. Помните о том, что проводимости (admittance) параллельных ветвей алгебраически складываются. Так как конденсатор подключается параллельно нагрузке, его проводимость будет суммироваться с проводимостью нагрузки. Рассчитаем комплексную проводимость нагрузки:

$$Y_{Load} = 1/Z_{Load} = 1/(3 + j1{,}508)\ \text{Ом} = 1 / (3{,}358\angle 26{,}687^{\circ})\ \text{Ом} = (0{,}298\ \angle -26{,}687)\ \text{См} = (0{,}266 - j0{,}134)\ \text{См},$$

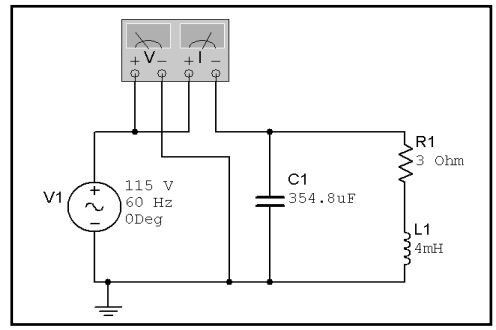
где См — сименс, равный 1/Ом (единица проводимости).

Комплексная проводимость конденсатора равна: $Y_C = j\omega C$. При подключении конденсатора параллельно нагрузке общая проводимость составит:

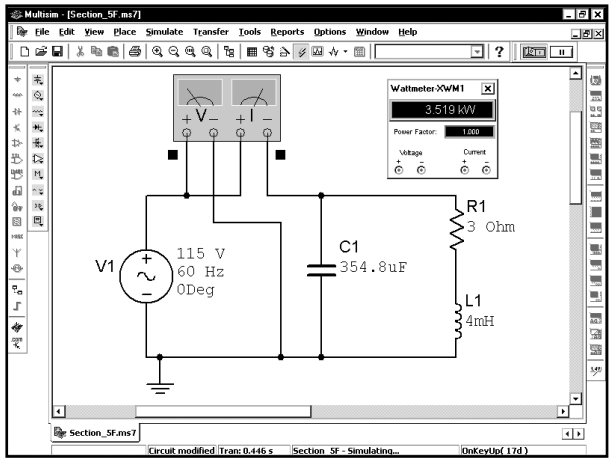
$$Y_{Total} = Y_{Load} + Y_C = (0{,}266 - j0{,}134) + j\omega C = 0{,}266 + j(\omega C - 0{,}134).$$

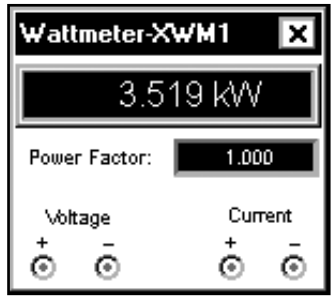
Чтобы компенсировать проводимость нагрузки, мы должны выполнить условие: $\omega C - 0{,}134 = 0$ или $C = 0{,}134 / \omega$. В нашем примере частота составляет 60 Гц, то есть $\omega = 2\pi 60$. При этой частоте понадобится конденсатор 354,8 мкФ.

Чтобы проверить наши расчеты, смоделируем схему из предыдущего примера с параллельно подключенным конденсатором. Включим конденсатор в схему, как показано ниже:



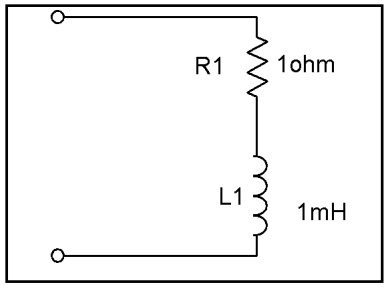
Чтобы выполнить моделирование, выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Run**, нажмем клавишу F5 или кнопку ***Run/stop simulation*** :



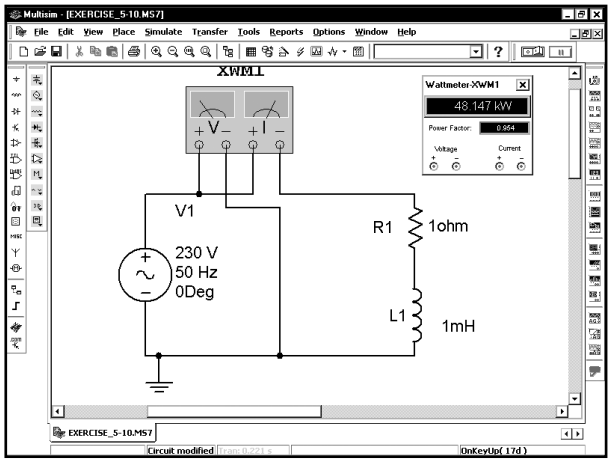


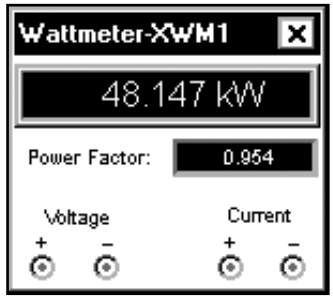
Из показаний видно, что нагрузка рассеивает такую же мощность, как и в предыдущем примере. Это ожидаемый результат, так как мы подключили конденсатор параллельно нагрузке, поэтому напряжение нагрузки в обеих моделях совпадает. Если напряжение нагрузки совпадает, значит, рассеиваемая мощность тоже должна совпадать. Конденсаторы и катушки индуктивности не рассеивают мощность, а только запасают ее и отдают обратно в источник питания, поэтому при подключении конденсатора параллельно нагрузке активная мощность не изменится. Видно также, что коэффициент мощности равен 1, следовательно, удалось создать новую нагрузку с единичным коэффициентом мощности.

УПРАЖНЕНИЕ 5-10: Рассчитайте рассеиваемую нагрузкой мощность и коэффициент мощности для следующей схемы. Допустим, что частота составляет 50 Гц, а действующее значение напряжения равно 230 В:

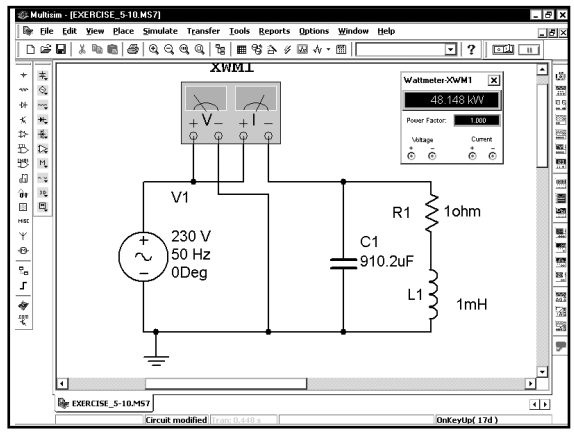


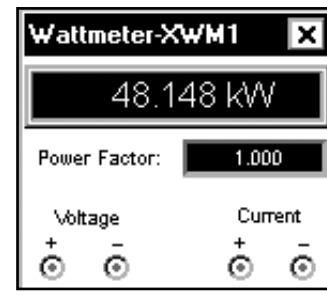
РЕШЕНИЕ: Добавьте в схему источник напряжения переменного тока; настройте действующее напряжение на 230 В, а частоту на 60 Гц. Подключите ваттметр так, как показано. Результаты отображены в окне устройства:





Для компенсации коэффициента мощности требуется подключить параллельно нагрузке конденсатор 910,2 мкФ:



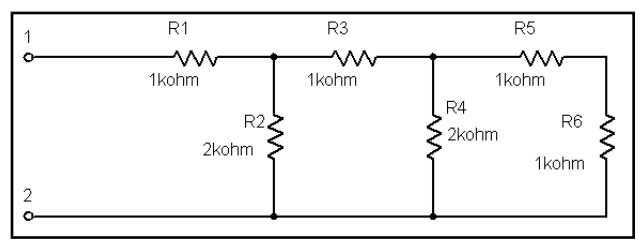


5.7. Измерение полного комплексного сопротивления

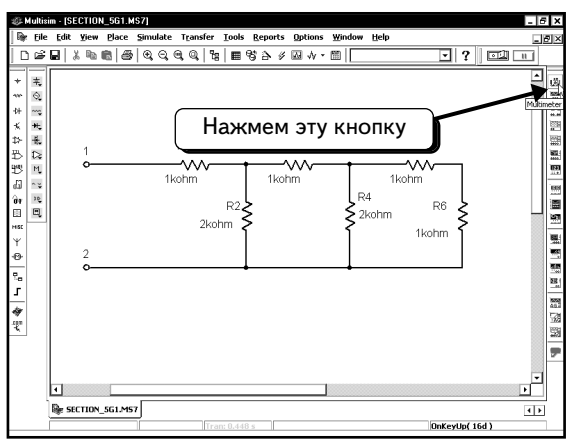
С помощью методик, описанных в этом разделе, можно измерять полное комплексное сопротивление между двумя узлами. В схемах с активным сопротивлением можно использовать мультиметр. Однако мультиметр не может измерить сопротивление в схеме с реактивными сопротивлениями (конденсаторами или катушками индуктивности), а также сопротивление в схеме, которая содержит активные компоненты, например транзисторы или ОУ. Определим полное комплексное сопротивление (импеданс) между двумя узлами для переменного тока. Для демонстрации возьмем два примера. Первый — это пассивная схема, которая содержит только резисторы. Второй пример — это схема с полевым транзистором jFET. В пассивной схеме воспользуемся мультиметром, чтобы сравнить результат с результатом, полученным с помощью новой методики.

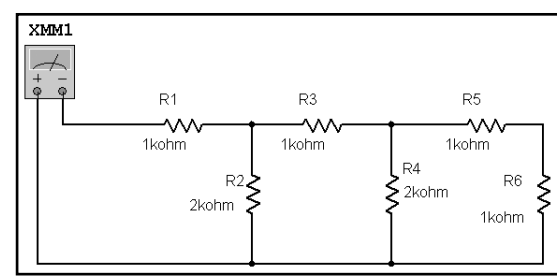
5.7.1. Измерение активного сопротивления с помощью мультиметра

Найдем сопротивление между узлами **1** и **2** в схеме:

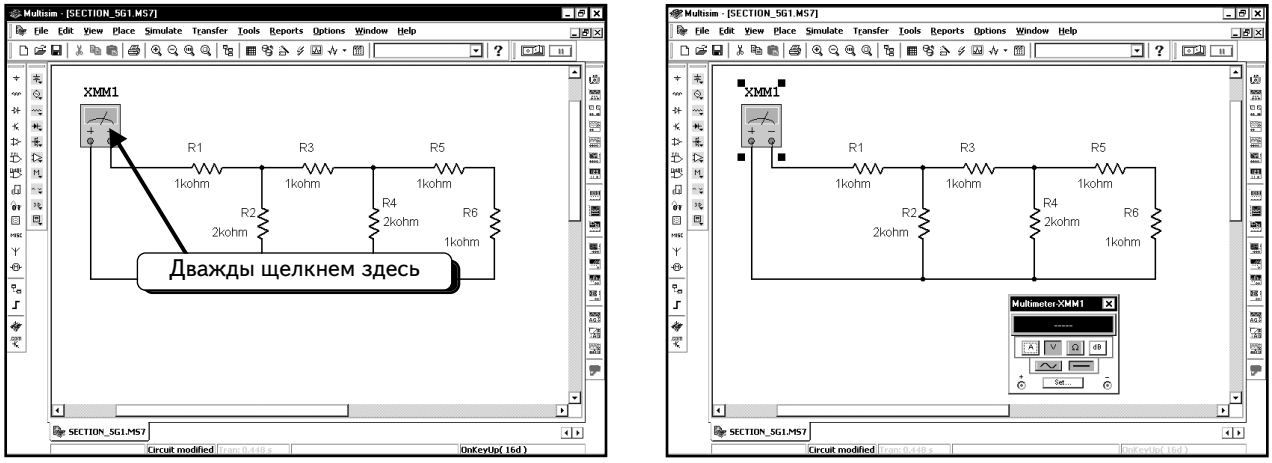


Так как эта схема только с активными сопротивлениями, можем подключить мультиметр и измерить сопротивление. Нажмем кнопку **Multimeter** , чтобы добавить прибор. Подключим его к схеме, как показано ниже:

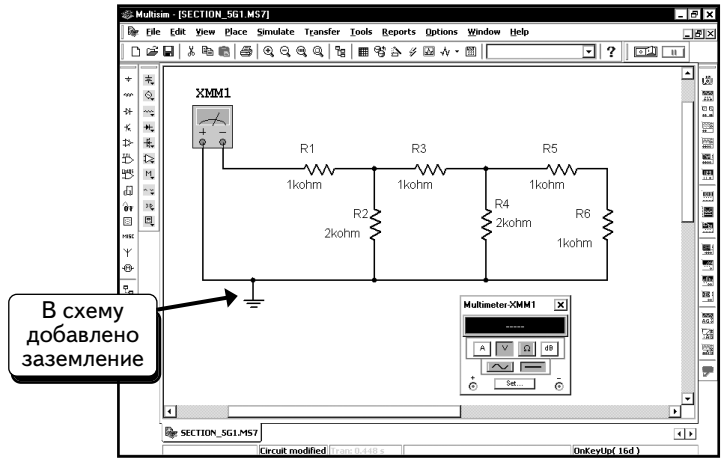




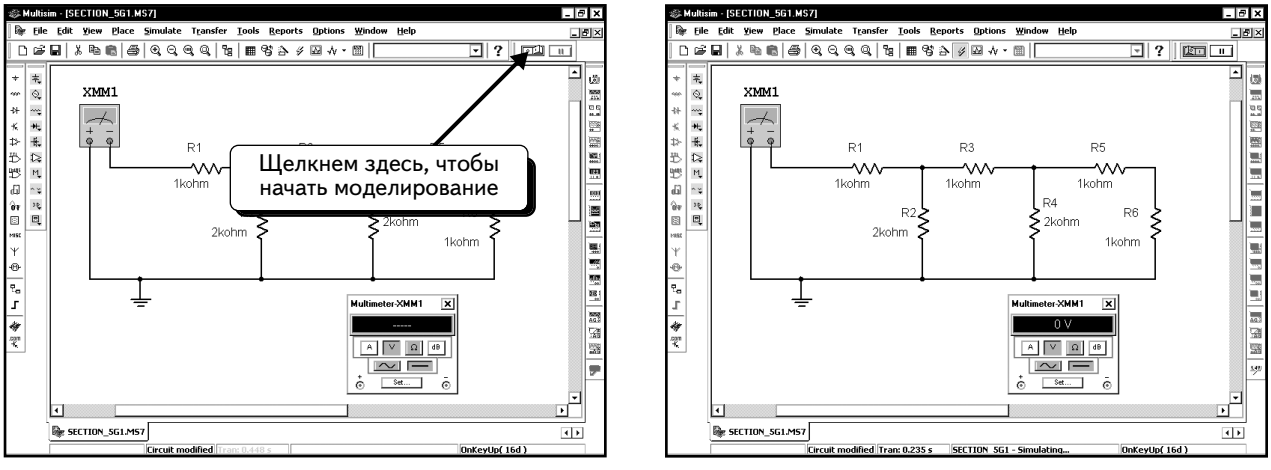
Дважды щелкнем по мультиметру, чтобы открыть его окно:



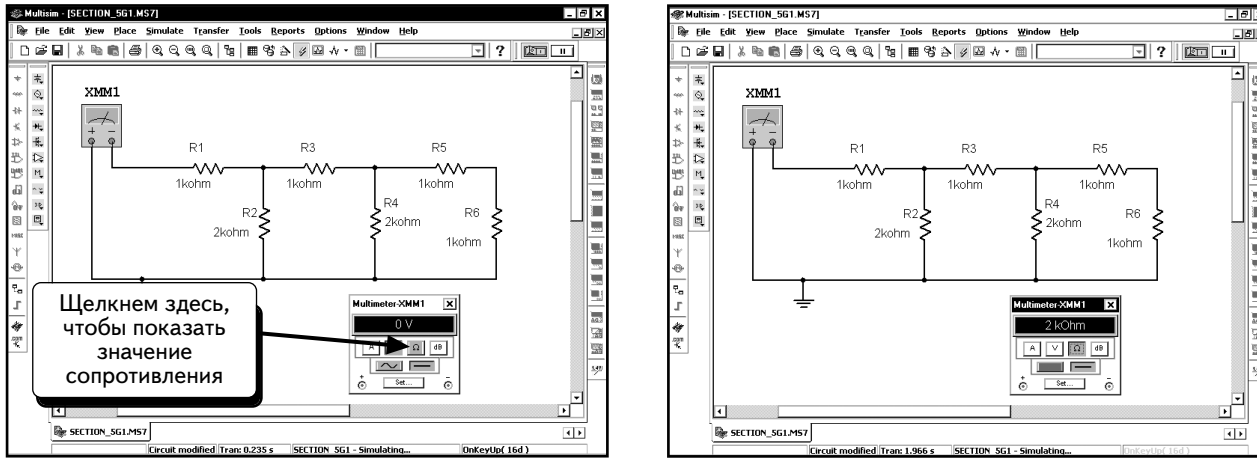
Подключим к схеме заземление. Несмотря на то, что в настоящей схеме наличие заземления необязательно, программа Multisim требует заземлить все схемы, чтобы правильно измерить напряжение. Добавим заземление так, как показано ниже:



Теперь можно выполнить моделирование. Нажмем кнопку ***Run/stop simulation*** :



По умолчанию мультиметр настроен на режим вольтметра и показывает напряжение между двумя полюсами. Необходимо измерить сопротивление, поэтому нажмем кнопку с символом :

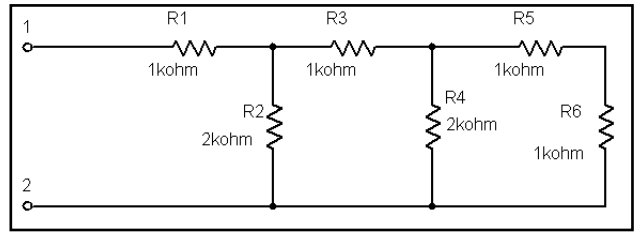


Через некоторое время устройство покажет сопротивление 2 кОм — это и есть ожидаемый результат. Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы остановить моделирование.

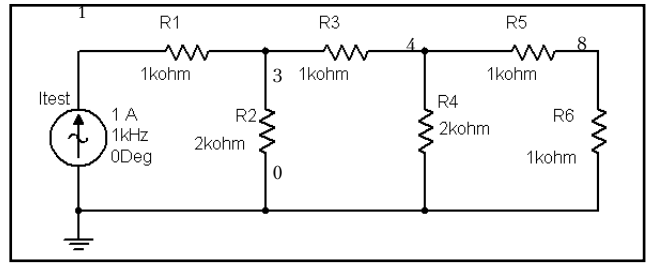
Измерять сопротивление с помощью мультиметра очень легко, однако он может измерять сопротивление только для резисторной схемы. Если необходимо измерить сопротивление в более сложной схеме, придется воспользоваться методикой, которая описана в следующем разделе.

5.7.2. Измерение сопротивления в пассивной схеме с помощью анализа SPICE

Применим новую методику, чтобы измерить сопротивление резисторной схемы, с которой мы работали в предыдущем разделе. Мы используем для анализа ту же схему, что и ранее, чтобы посмотреть, получаться ли те же результаты.

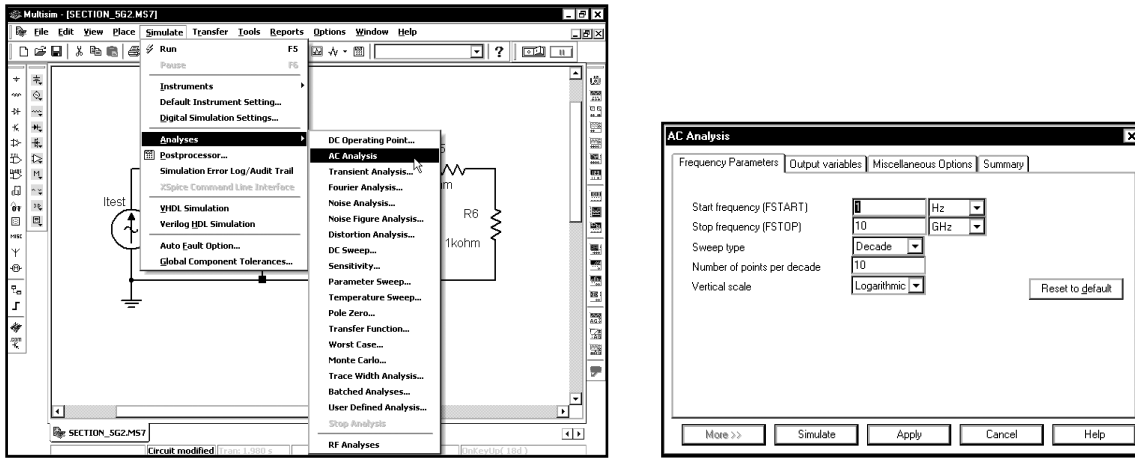


Добавим источник переменного тока, как показано ниже. Новый источник добавлен между узлами 1 и 2, чтобы измерить сопротивление именно между этими точками. Можете использовать источник переменного тока или напряжения. Создадим схему, как показано ниже. Заземлим один из узлов, так как это необходимо для моделирования:

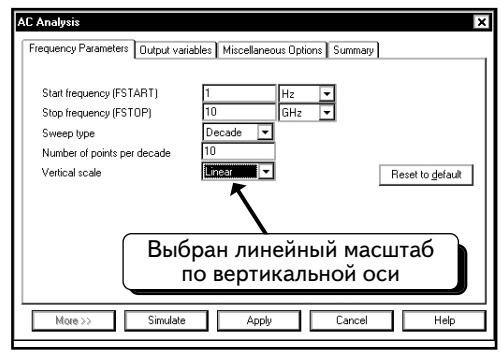


Хотя данная схема не содержит зависимых источников, катушек или конденсаторов, можно было бы подключить любой из этих компонентов. Эта схема была выбрана потому, что нетрудно рассчитать ее сопротивление и полученный результат можно сравнить с результатом исполнения функции SPICE или с результатами, полученными с помощью мультиметра. Расчетное сопротивление данной схемы составляет 2 кОм.

Далее следует настроить функцию **AC Analysis**. Выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **AC Analysis**:

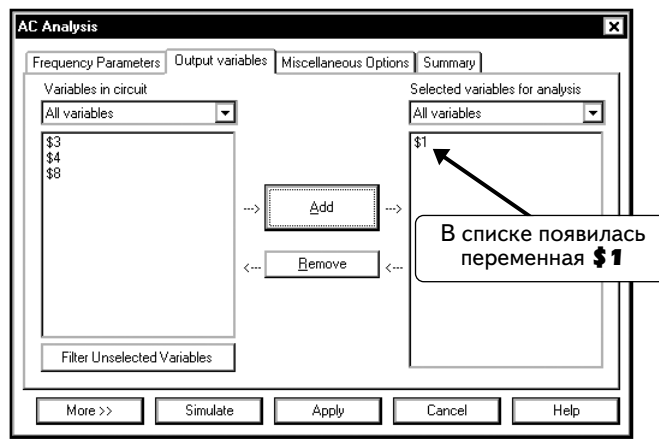


Так как эта схема с активным сопротивлением, настройки частоты не имеют значения, и не надо изменять настройки по умолчанию. Единственный параметр, который будет изменен, — это параметр ***Vertical scale***. Схема пассивная, следовательно, сопротивление не будет изменяться с частотой. Изменим значение параметра на ***Linear***:

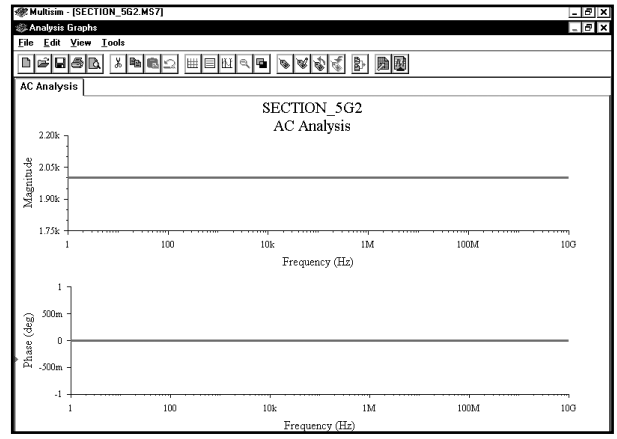


Сопротивление в схеме вычисляется путем деления напряжения между узлом 1 и заземлением на амплитуду источника тока: V(1)/I(Itest). Так как мы не указали значение для источника переменного тока, оно по умолчанию будет равно 1 А. Это значит, что сопротивление схемы равно напряжению на узле 1. Следовательно, достаточно только отобразить графически напряжение на узле 1.

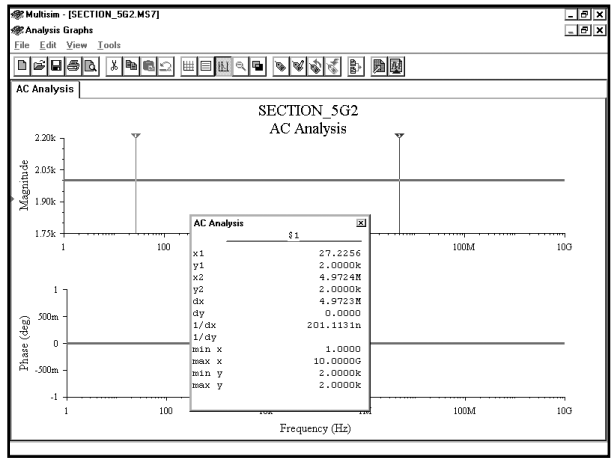
Выберем выходные переменные. Щелкнем по вкладке ***Output variables*** и выберем переменную ***$1***:

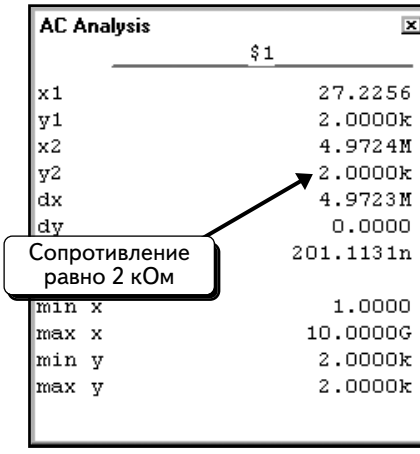


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Мы увидим кривую:



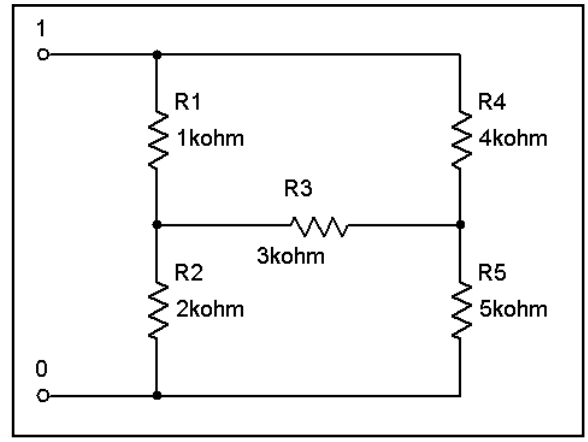
С помощью курсоров определим численное значение:



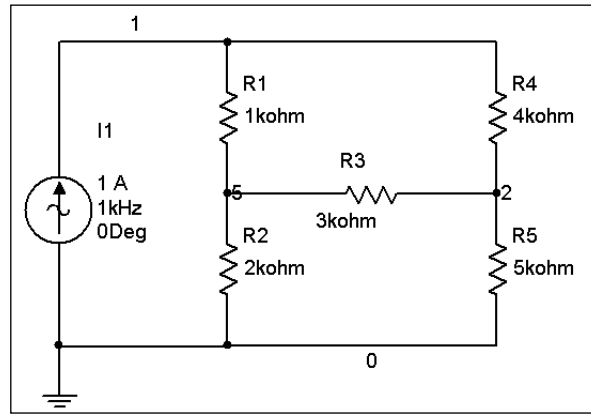


Эта кривая показывает, что сопротивление не зависит от частоты и равно 2 кОм, как и предполагалось. Если бы схема включала катушки индуктивности или конденсаторы, сопротивление зависело бы от частоты.

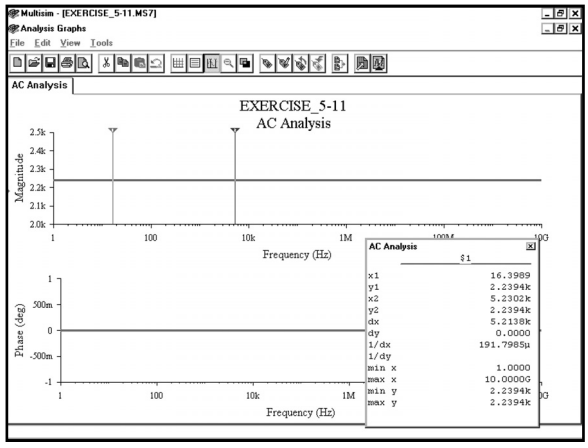
УПРАЖНЕНИЕ 5-11: Определите эквивалентное сопротивление резисторной схемы:



РЕШЕНИЕ: Подключите независимый источник тока между двумя полюсами, сопротивление между которыми вы хотите измерить:



Эквивалентное сопротивление определяется как V(**1**)/I(**Itest**). Так как ток источника **Itest** составляет 1 А, достаточно отобразить напряжение на узле 1. Настройте и выполните анализ AC Analysis и получите график напряжения на узле 1:



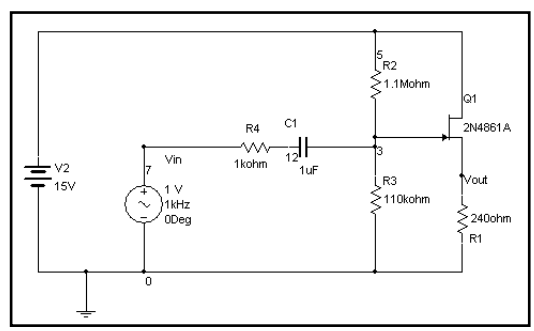
AC Analysis

	$1
x1	16.3989
y1	2.2394k
x2	5.2302k
y2	2.2394k
dx	5.2138k
dy	0.0000
1/dx	191.7985µ
1/dy	
min x	1.0000
max x	10.0000G
min y	2.2394k
max y	2.2394k

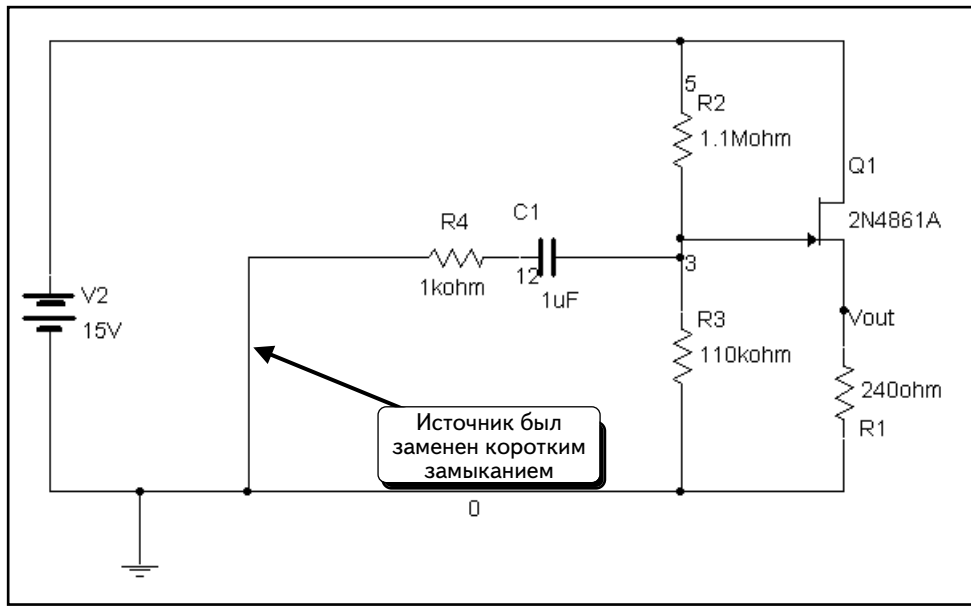
Сопротивление равно **2,2394** кОм.

5.7.3. Измерение сопротивления в активной схеме с помощью анализа SPICE

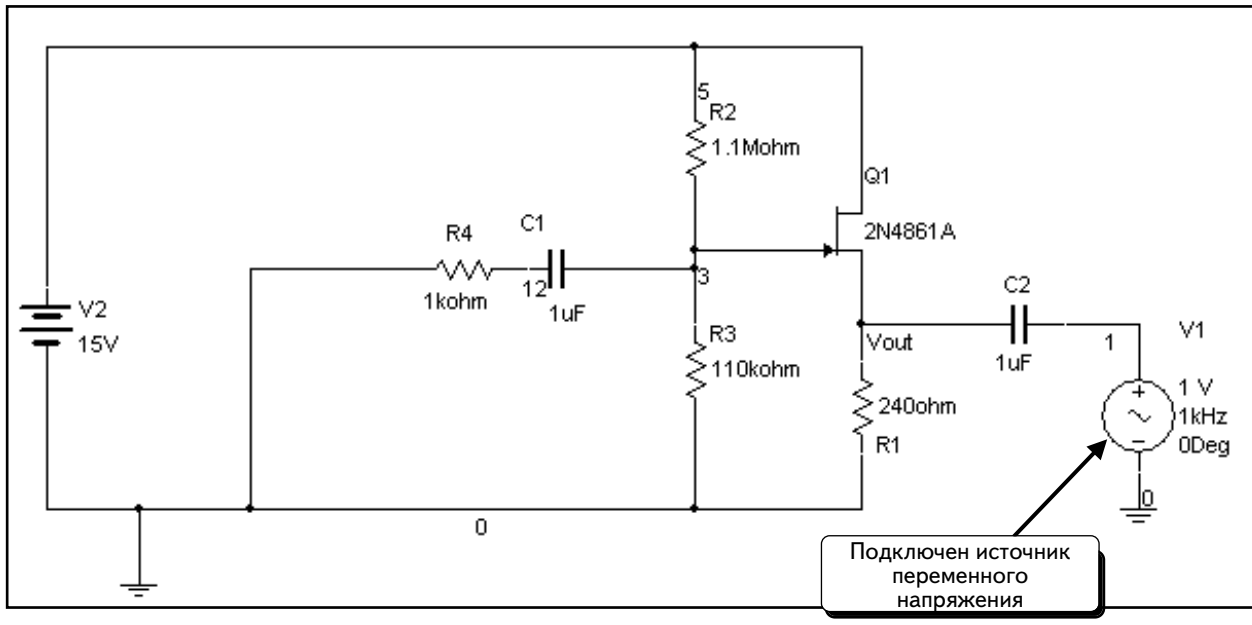
Теперь рассчитаем выходное сопротивление следующей схемы с полевым транзистором jFET, как показано ниже. Выходное сопротивление определяется на истоке транзистора jFET, поэтому необходимо измерить полное комплексное сопротивление (импеданс) между узлами **Vout** и **0 (заземление)**. Данной методикой можно пользоваться для расчета сопротивления в любой схеме.



При определении выходного сопротивления следует заменить источник коротким замыканием:



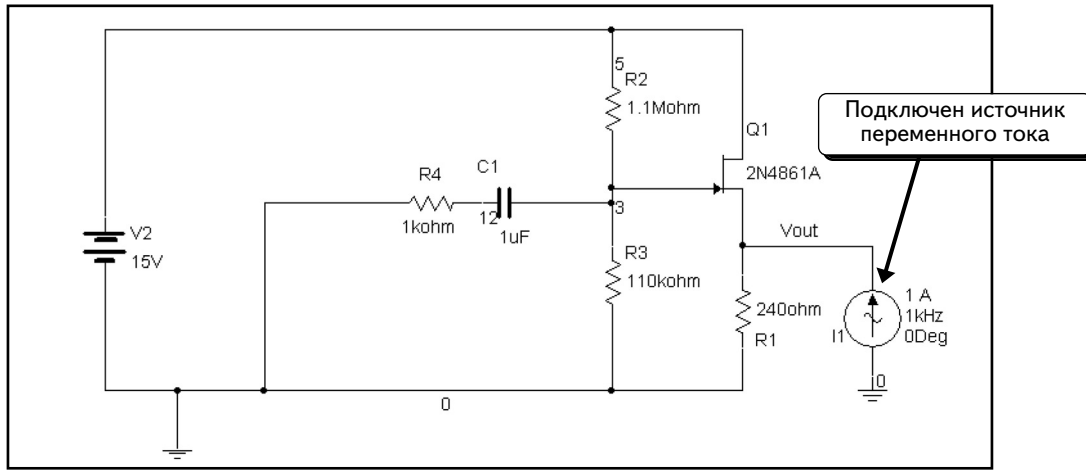
Далее добавим источник переменного тока на выходе, чтобы измерить сопротивление. Можно использовать источник переменного тока или напряжения. Если добавляете источник напряжения, создайте схему, показанную ниже:



Конденсатор **C2** необходим, так как он предотвращает изменение рабочей точки транзистора. Помните о том, что **V1** — это источник напряжения переменного тока. При анализе смещения все источники переменного тока настраиваются на нулевое значение. Так как компонент **V1** является источником напряжения, он будет заменен коротким замыканием. Без конденсатора **C2** исток транзистора jFET был бы заземлен. В результате режим смещения транзистора был бы нарушен, а измерение сопротивления привело бы к неверным результатам.

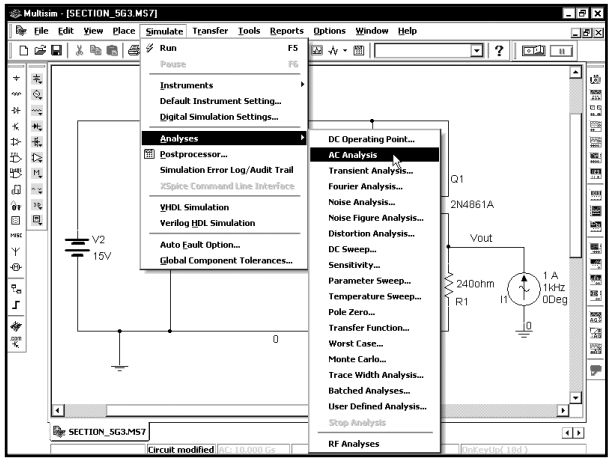
Выходное сопротивление повторителя можно отобразить графически в виде коэффициента V**(Vout)**/I**(V1)**. Важно отметить, что выражение V**(V1)**/I**(V1)** — это не выходное сопротивление, а сумма этого выходного сопротивления и сопротивления конденсатора.

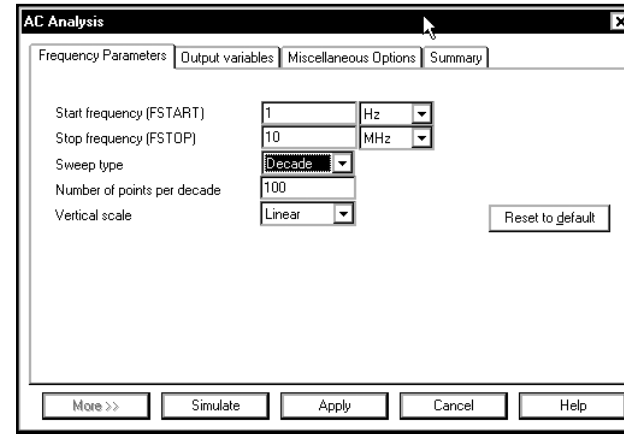
Для второго метода расчета сопротивления схемы будем использовать источник переменного тока:



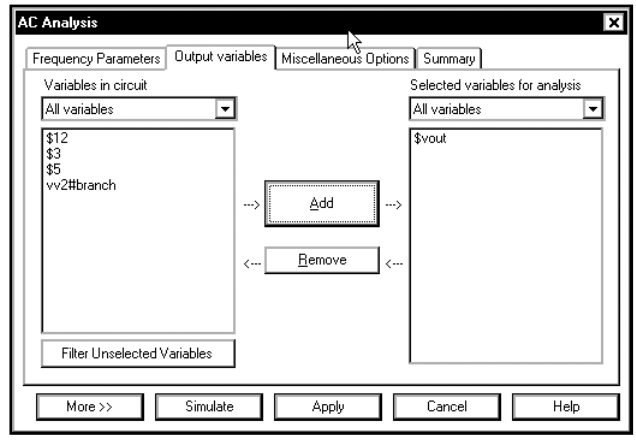
I1 — это источник переменного тока. Обратите внимание: между источником тока и транзистором отсутствует блокирующий конденсатор. При расчете смещения все источники переменного тока настраиваются на нулевое значение. Если источник тока настроен на нулевое значение, он заменяется разрывом. При подключении к узлу **Vout** разрыва схема эквивалентна исходной, причем не изменяется и смещение. Выходное сопротивление схемы рассчитывается с помощью коэффициента V**(Vout)**/I**(I1)**. Так как модуль источника тока **I1** составляет 1 А, сопротивление будет равно напряжению на узле **Vout**.

Далее надо настроить функцию **AC Analysis** и отобразить напряжение на узле **Vout**. Выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Analyses** ⇒ **AC Analysis**. Введем данные в диалоговом окне:

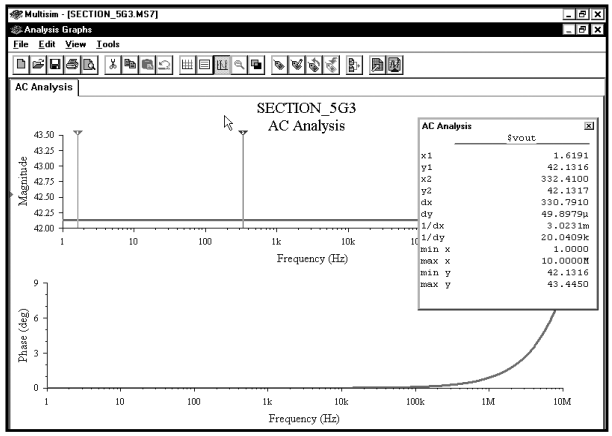




Щелкнем по вкладке **Output variables** и выберем переменную **$vout**:



Теперь все готово для моделирования. Нажмем кнопку **Simulate** и с помощью курсоров определим выходное сопротивление схемы:

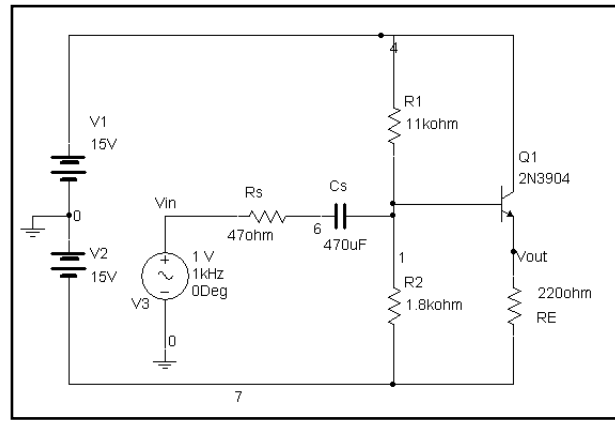


AC Analysis

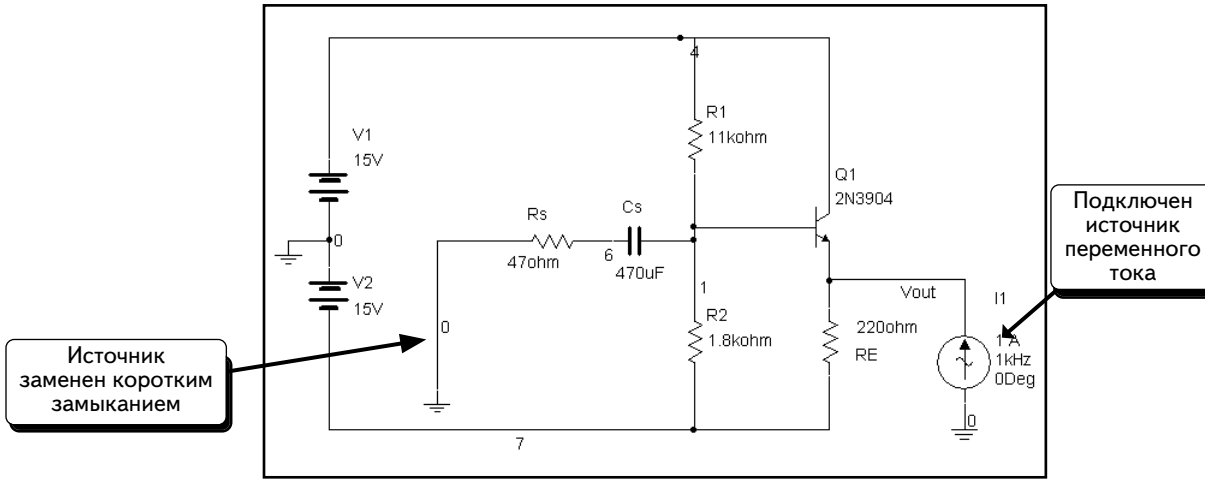
	$vout
x1	1.6191
y1	42.1316
x2	332.4100
y2	42.1317
dx	330.7910
dy	49.8979µ
1/dx	3.0231m
1/dy	20.0409k
min x	1.0000
max x	10.0000M
min y	42.1316
max y	43.4450

Кривая показывает, что в диапазоне частот до 1 МГц сопротивление составляет около 42 Ом.

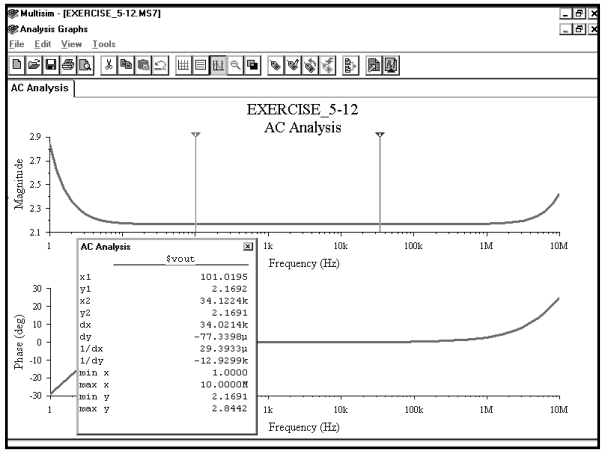
УПРАЖНЕНИЕ 5-12: Определите выходное сопротивление между заземлением и эмиттером:



РЕШЕНИЕ: Замените независимый источник напряжения коротким замыканием. Добавьте независимый источник тока между двумя узлами, между которыми вы будете измерять сопротивление:



Выходное сопротивление определяется как V**(Vout)**/I**(I1)**. Так как амплитуда источника **I1** составляет 1 А, выходное сопротивление будет равно напряжению узла **Vout**:



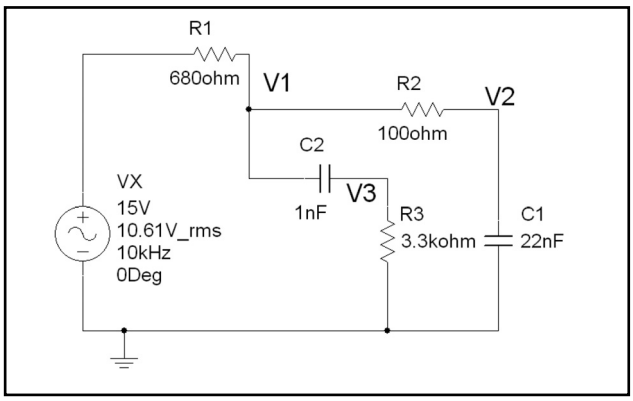
AC Analysis

	$vout
x1	101.0195
y1	2.1692
x2	34.1224k
y2	2.1691
dx	34.0214k
dy	-77.3398µ
1/dx	29.3933µ
1/dy	-12.9299k
min x	1.0000
max x	10.0000M
min y	2.1691
max y	2.8442

Сопротивление на средних частотах составляет около 2,2 Ом. Изменение сопротивления на низких частотах вызвано наличием конденсатора **Cs**, а на высоких частотах — емкостным сопротивлением самого транзистора.

5.8. Задачи

Задача 5.1: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь индикаторами и определите действующее значение напряжения на узле V1:



Задача 5.2: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V2 и тока через резистор R1.

Задача 5.3: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V3 и тока через конденсатор C2.

Задача 5.4: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на резисторе R1 и тока через конденсатор C2.

Задача 5.5: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V1 и тока через резистор R2.

Задача 5.6: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V2 и тока через конденсатор C1.

Задача 5.7: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V3 и тока через резистор R3.

Задача 5.8: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на конденсаторе C2 и тока через конденсатор C2.

Задача 5.9: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V1 и тока через резистор R1.

Задача 5.10: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V2 и тока через резистор R2.

Задача 5.11: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V3 и тока через резистор R3.

Задача 5.12: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на конденсаторе C1 и тока через на резистор R2.

Задача 5.13: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V1 и тока через конденсатор C2.

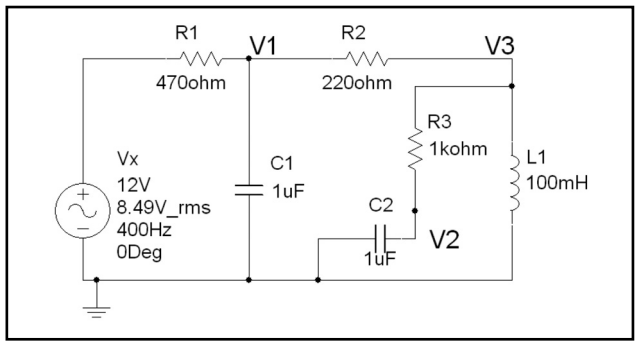
Задача 5.14: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V2 и тока через конденсатор C1.

Задача 5.15: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V3 и тока через конденсатор C2.

Задача 5.16: В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Analysis** и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узлах V1, V2 и V3.

Задача 5.17. В схеме из задачи 5.1 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Analysis** и определите фазы напряжений на узлах V1, V2 и V3.

Задача 5.18: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь индикаторами и определите действующее значение напряжения на узле V1:



Задача 5.19: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V2, а также тока через резистор R1.

Задача 5.20: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V3, а также тока через конденсатор C2.

Задача 5.21: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V1, а также тока через резистор R2.

Задача 5.22: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V2, а также тока через конденсатор C1.

Задача 5.23: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на конденсаторе C2, а также тока через конденсатор C1.

Задача 5.24: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V3, а также тока через катушку индуктивности L1.

Задача 5.25: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V1, а также тока через резистор R1.

Задача 5.26: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V2, а также тока через резистор R2.

Задача 5.27: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V3, а также тока через катушку L1.

Задача 5.28: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на резисторе R3, а также тока через катушку L1.

Задача 5.29: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V1, а также тока через конденсатор C2.

Задача 5.30: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V2, а также тока через конденсатор C1.

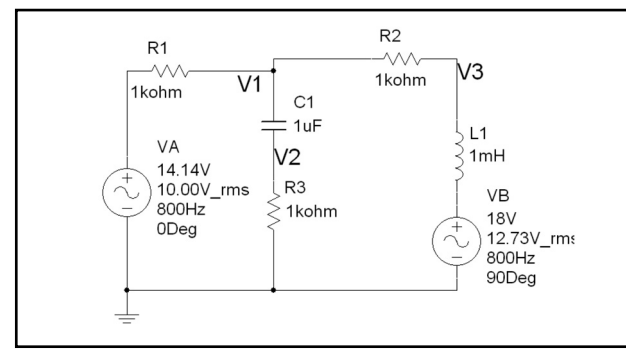
Задача 5.31: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V3, а также тока через катушку L1.

Задача 5.32: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на конденсаторе C1, а также тока через катушку L1.

Задача 5.33: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Analysis** и определите амплитуды (максимальные значения) напряжений на узлах V1, V2 и V3.

Задача 5.34: В схеме из задачи 5.18 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Analysis** и определите фазы напряжений на узлах V1, V2 и V3.

Задача 5.35: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V1:



Задача 5.36: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V2 и тока через резистор R1.

Задача 5.37: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь индикаторами и определите действующие значения напряжения на узле V3 и тока через конденсатор C1.

Задача 5.38: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V1 и тока через резистор R2.

Задача 5.39: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на катушку L1 и тока через резистор R2.

Задача 5.40: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V2 и тока через конденсатор C1.

Задача 5.41: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь индикаторами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V3 и тока через катушку L1.

Задача 5.42. В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V1 и тока через резистор R1.

Задача 5.43: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V2 и тока через резистор R2.

Задача 5.44: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на конденсаторе C1 и тока через резистор R2.

Задача 5.45: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите действующие значения напряжения на узле V3 и тока через катушку L1.

Задача 5.46: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V1 и тока через конденсатор C1.

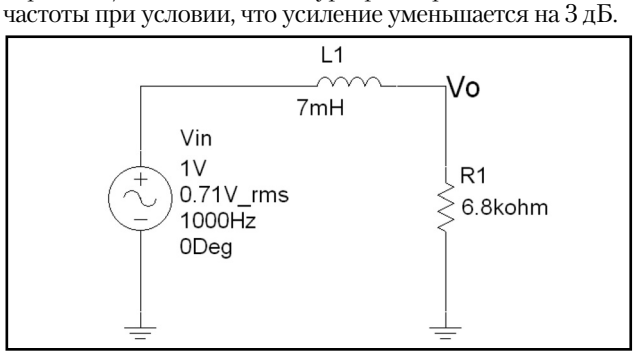
Задача 5.47: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V2 и тока через конденсатор C1.

Задача 5.48: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь мультиметрами и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узле V3 и тока через катушку L1.

Задача 5.49: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Analysis** и определите амплитуды (максимальные значения) напряжения на узлах V1, V2 и V3.

Задача 5.50: В схеме из задачи 5.35 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Analysis** и определите фазы напряжений на узлах V1, V2 и V3.

Задача 5.51: В схеме, показанной ниже воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 3 дБ.



Задача 5.52: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 3 дБ. Чему равны коэффициент усиления и фаза при этой частоте?

Задача 5.53: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 20 дБ. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.54: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 40 дБ. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.55: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 60 дБ. Чему равны усиление и фаза в этой точке?

Задача 5.56: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -45°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.57: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -22°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.58: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -75°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.59: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 20 дБ. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.60: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 40 дБ. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

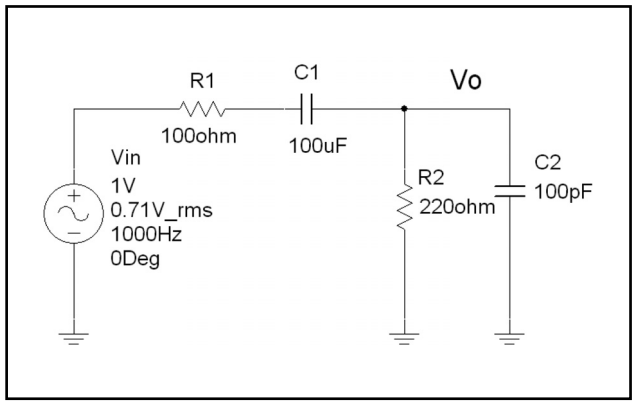
Задача 5.61: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 60 дБ. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.62: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -45°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.63: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -22°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.64: В схеме из задачи 5.51 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -75°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке?

Задача 5.65: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 3 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.



Задача 5.66: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 3 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.67: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 20 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.68: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 40 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.69: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 60 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.70: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза равна -45°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.71: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза равна $+22^{\circ}$. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.72: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь функцией SPICE **AC Sweep Analysis**, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза равна $+75^{\circ}$. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.73: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 20 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.74: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что усиление уменьшается на 40 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

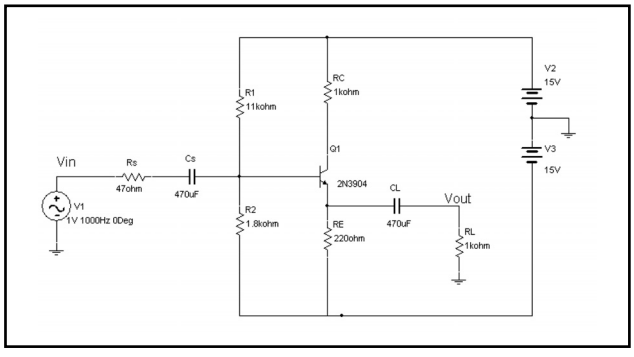
Задача 5.75: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что коэффициент усиления уменьшается на 60 дБ по сравнению с коэффициентом усиления на средней частоте. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.76: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет $+45^{\circ}$. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.77: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -22°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.78: В схеме из задачи 5.65 воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать графики Боде для амплитуды и фазы Vo/Vin. С помощью курсоров определите значение частоты при условии, что фаза составляет -75°. Чему равны коэффициент усиления и фаза в этой точке? Смоделируйте схему для диапазона частоты от 10 мГц до 10 ГГц.

Задача 5.79: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать график амплитуды. Определите усиление (Vout/Vin), а также верхнее и нижнее значение частоты –3 дБ для транзистора. (Обратите внимание на то, что эта схема очень похожа на ту, с которой мы работали в разделе 5.5. Значения компонентов должны совпадать.)

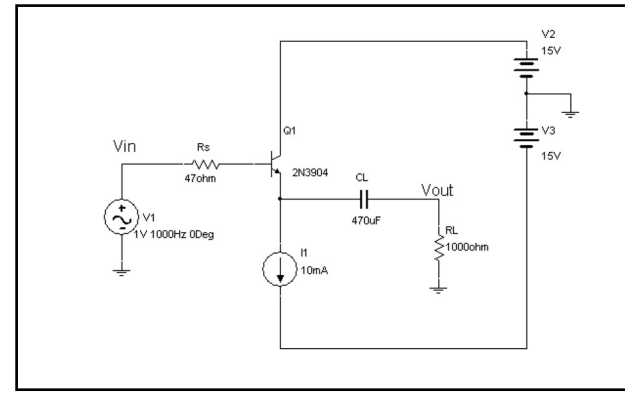


Задача 5.80: Решите задачу 5.79 с помощью функции SPICE **AC Sweep Analysis**.

Задача 5.81: Решите задачу 5.79 при условии, что RL равно 10 кОм, 100 и 10 Ом.

Задача 5.82: Решите задачу 5.79 при условии, что RC = 0 Ом. В чем проявляется воздействие параметра RC на схему?

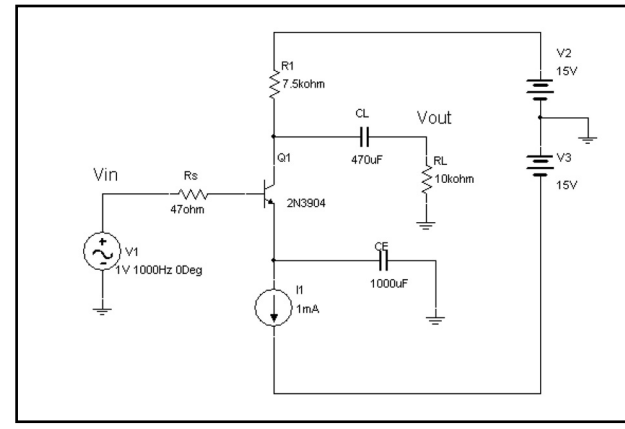
Задача 5.83: В схеме, показанной ниже воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать АЧХ и определить коэффициент усиления (Vout/Vin)на средней частоте, а также нижнее значение граничной частоты –3 дБ для усилителя.



Задача 5.84: Решите задачу 5.83 с помощью функции SPICE **AC Sweep Analysis**.

Задача 5.85: Решите задачу 5.83 при условии, что RL равно 10 кОм, 100 и 10 Ом.

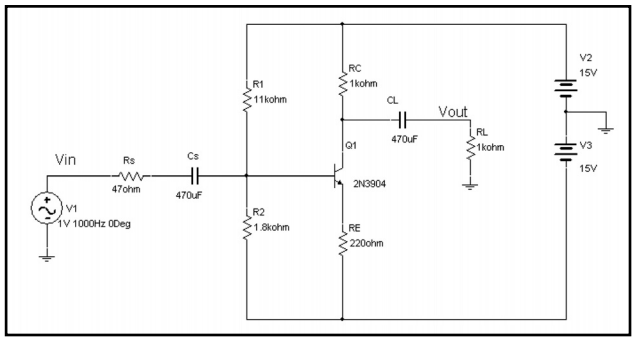
Задача 5.86: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать график амплитуды. Определите усиление (Vout/Vin), а также верхнее и нижнее значение частоты –3 дБ для транзистора. (Обратите внимание на то, что эта схема похожа на ту, с которой мы работали в разделе 5.3.)



Задача 5.87: Решите задачу 5.86 с помощью функции SPICE **AC Sweep Analysis**.

Задача 5.88: Решите задачу 5.86 при условии, что RL равно 1 кОм, 100 и 10 Ом.

Задача 5.89: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь Боде-плоттером, чтобы создать АЧХ. Определите коэффициент усиления (Vout/Vin), а также верхнее и нижнее значения граничной частоты –3 дБ для усилителя. (Обратите внимание на то, что эта схема похожа на ту, с которой мы работали в разделе 5.3. Значения компонентов совпадают, а компонент CE удален.)



Задача 5.90: Решите задачу 5.89 с помощью функции Spice AC Sweep Analysis.

Задача 5.91: Решите задачу 5.89 при условии, что RL равно 10 кОм, 100 и 10 Ом.

Задача 5.92:

1. Создайте схему неинвертирующего усилителя на ОУ LM741CH с коэффициентом усиления 1. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

2. Создайте схему инвертирующего усилителя на ОУ LM741CH с коэффициентом усиления –1. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ. Используйте самый небольшой резистор с сопротивлением 10 кОм.

3. Несмотря на то что схемы в пунктах 1 и 2 имеют одинаковую значение коэффициента усиления, верхнее значение граничной частоты –3 дБ отличается. Почему?

Задача 5.93:

1. Создайте схему неинвертирующего усилителя на ОУ TL072ACD с коэффициентом усиления 1. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

2. Создайте схему инвертирующего усилителя на ОУ TL072ACD с коэффициентом усиления –1. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ. Используйте самый небольшой резистор с сопротивлением 10 кОм.

3. Несмотря на то что схемы в пунктах 1 и 2 имеют одинаковое значение коэффициента усиления, верхнее значение граничной частоты –3 дБ отличается. Почему?

Задача 5.94:

1. Создайте схему неинвертирующего усилителя на ОУ OPA602BM с коэффициентом усиления 1. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

2. Создайте схему инвертирующего усилителя на ОУ OPA602BM с коэффициентом усиления –1. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ. Используйте самый небольшой резистор с сопротивлением 10 кОм.

3. Несмотря на то что схемы в пунктах 1 и 2 имеют одинаковое значение коэффициента усиления, верхнее значение граничной частоты –3 дБ отличается. Почему?

Задача 5.95:

1. Создайте схему неинвертирующего усилителя на ОУ LM741CH с коэффициентом усиления 100. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

2. Создайте схему инвертирующего усилителя на ОУ LM741CH с коэффициентом усиления –100. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ. Используйте самый небольшой резистор с сопротивлением 10 кОм.

3. Модели, полученные в пунктах 1 и 2, имеют одинаковое усиление и верхнее значение частоты –3 дБ. Этот результат отличается от результата, полученного в задаче 5.92. Почему?

Задача 5.96:

1. Создайте схему неинвертирующего усилителя на ОУ TL072ACD с коэффициентом усиления 100. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

2. Создайте схему инвертирующего усилителя на ОУ TL072ACD с коэффициентом усиления –100. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

3. Модели, полученные в пунктах 1 и 2, имеют одинаковое усиление и верхнее значение частоты –3 дБ. Этот результат отличается от результата, полученного в задаче 5.93. Почему?

Задача 5.97:

1. Создайте схему неинвертирующего усилителя на ОУ OPA602BM с коэффициентом усиления 100. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

2. Создайте схему инвертирующего усилителя на ОУ OPA602BM с коэффициентом усиления –100. Создайте график Боде для амплитуды, проверьте коэффициент усиления для средней частоты и определите верхнее значение граничной частоты –3 дБ.

3. Модели, полученные в пунктах 1 и 2, имеют одинаковое усиление и верхнее значение частоты –3 дБ. Этот результат отличается от результата, полученного в задаче 5.94. Почему?

Задача 5.98: Создайте инвертирующий суммирующий усилитель на ОУ, реализующий равенство: $V_{OUT} = -V_A - 10V_B - 100V_C$ (Не используйте виртуальные компоненты ОУ!)

1. При условии, что входные напряжения V_B и V_C равны нулю (заземлены), постройте график Боде для V_{OUT}/V_A. Проверьте коэффициент усиления на средней частоте и определите верхнее граничное значение частоты –3 дБ.

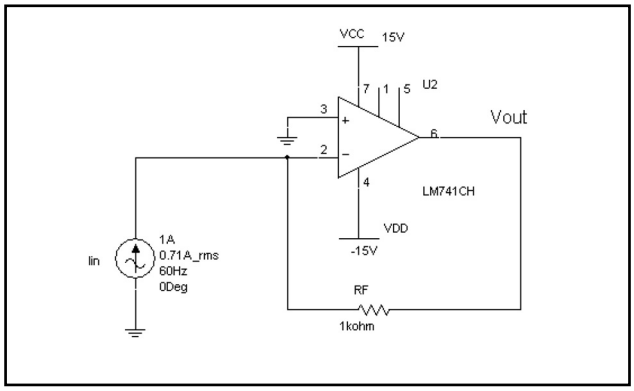
2. При условии, что входные напряжения V_A и V_C равны нулю (заземлены), постройте график Боде для V_{OUT}/V_B. Проверьте коэффициент усиления на средней частоте и определите верхнее граничной значение частоты –3 дБ.

3. При условии, что входные значения V_A и V_B равны нулю (заземлены), постройте график Боде для V_{OUT}/V_C. Проверьте коэффициент усиления на средней частоте и определите верхнее граничной значение частоты –3 дБ.

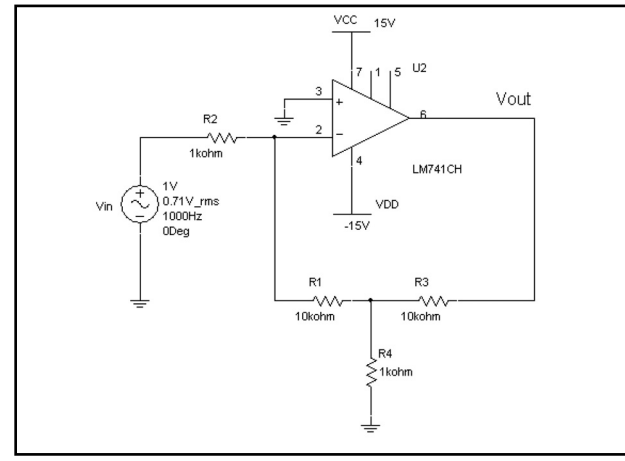
4. С помощью программы Postprocessor создайте на одном графике кривые V_{OUT}/V_A, V_{OUT}/V_B и V_{OUT}/V_C.

5. Несмотря на то что усиление для каждой кривой разное, верхние значения граничной частоты –3 дБ совпадают. Почему?

Задача 5.99: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь опцией Parameter Sweep, чтобы отобразить усиление V_{OUT}/V_{IN} в децибелах при условии, что параметр RF равен, соответственно, 1,10 100 кОм и 1 МОм.



Задача 5.100: В схеме, показанной ниже, воспользуйтесь опцией Parameter Sweep, чтобы отобразить коэффициент усиления V_{OUT}/V_{IN} в децибелах при условии, что сопротивление R4 равно, соответственно, 1, 10, 100 кОм и 1 МОм.



Задача 5.101: Комплексная нагрузка имеет сопротивление $15\angle -37^o$ при частоте 60 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.102: Нагрузка имеет сопротивление $15\angle 37^o$ при частоте 60 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику со средним напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.103: Нагрузка имеет сопротивление $25\angle -25^{o}$ при частоте 400 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.104: Нагрузка имеет сопротивление $25\angle -25^{o}$ при частоте 400 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.105: Нагрузка имеет сопротивление $1\angle 30^{o}$ при частоте 60 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.106: Нагрузка имеет сопротивление $1\angle 30^{o}$ при частоте 60 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 115 В и частотой 60 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.107: Нагрузка имеет сопротивление $0{,}51 \angle -20^{o}$ при частоте 400 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.108: Нагрузка имеет сопротивление $0{,}5\angle -20^{o}$ при частоте 400 Гц.

1. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

2. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

3. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

4. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

5. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

6. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

7. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.109: Нагрузка, подключенная к источнику со средним напряжением 120 В и частотой 60 Гц, имеет отстающий коэффициент мощности 0,93 и рассеивает 360 Вт мощности.

1. Определите сопротивление нагрузки.

2. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

3. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

4. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

5. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

6. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

7. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

8. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.110: Нагрузка, подключенная к источнику со средним напряжением 220 В и частотой 60 Гц, имеет опережающий коэффициент мощности 0,93 и абсорбирует 1200 Вт мощности.

1. Определите сопротивление нагрузки.

2. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

3. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

4. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

5. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

6. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

7. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

8. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.111: Нагрузка, подключенная к источнику со средним напряжением 208 В и частотой 400 Гц, имеет опережающий коэффициент мощности 0,89 и рассеивает 10 кВт мощности.

1. Определите сопротивление нагрузки.

2. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

3. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

4. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

5. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

6. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

7. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

8. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

Задача 5.112: Нагрузка, подключенная к источнику со средним напряжением 208 В и частотой 400 Гц, имеет отстающий коэффициент мощности 0,85 и рассеивает 5 кВт мощности.

1. Определите сопротивление нагрузки.

2. Создайте схему с таким сопротивлением. Схема должна включать катушки индуктивности, конденсаторы и/или резисторы. Вы можете использовать столько компонентов, сколько сочтете нужным.

3. Рассчитайте коэффициент мощности вручную. Эта схема работает с опережающим или отстающим коэффициентом мощности?

4. Вручную рассчитайте мощность, которая будет рассеиваться нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

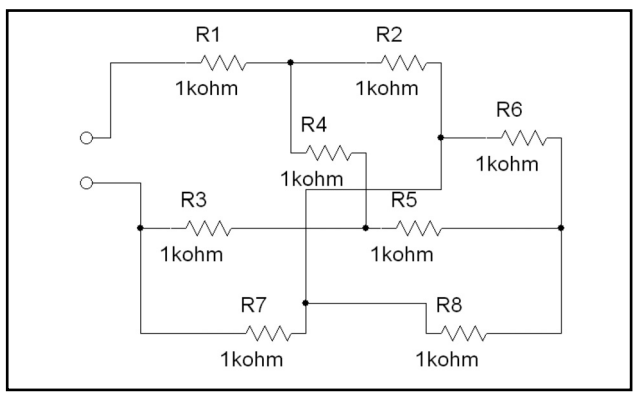
5. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую нагрузкой.

6. Укажите один компонент, который может быть добавлен в нагрузку, чтобы компенсировать коэффициент мощности.

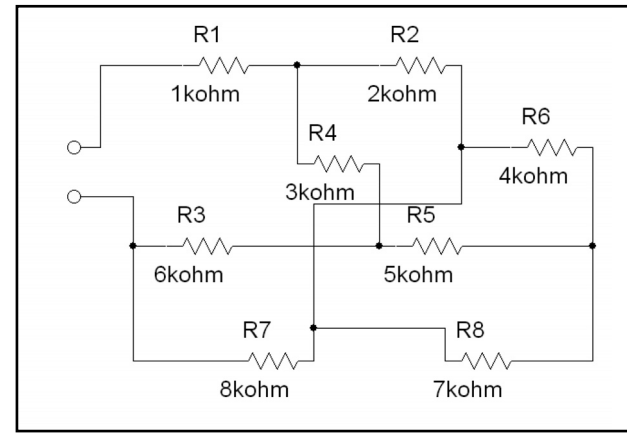
7. Вручную рассчитайте мощность в ваттах, которая будет рассеиваться компенсированной нагрузкой при подключении к источнику с действующим напряжением 220 В и частотой 400 Гц.

8. С помощью программы Multisim проверьте коэффициент мощности, а также мощность, рассеиваемую компенсированной нагрузкой.

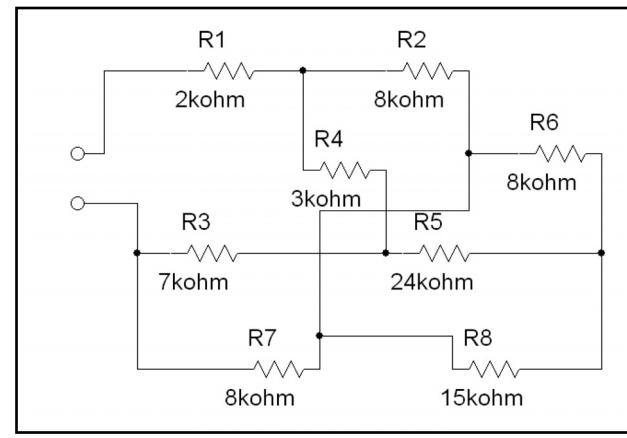
Задача 5.113: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



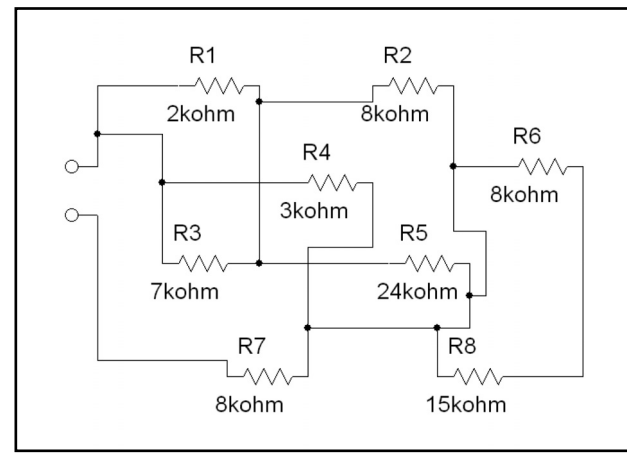
Задача 5.114: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



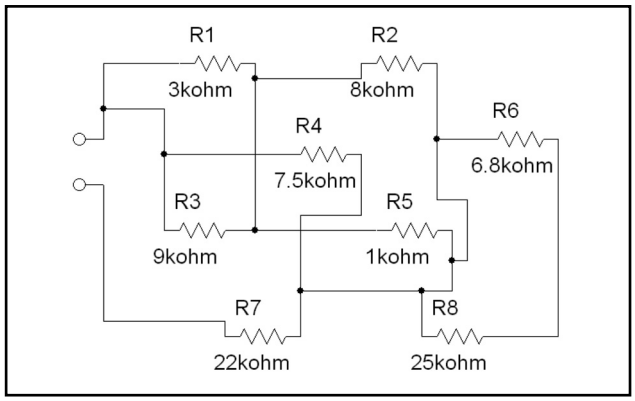
Задача 5.115: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



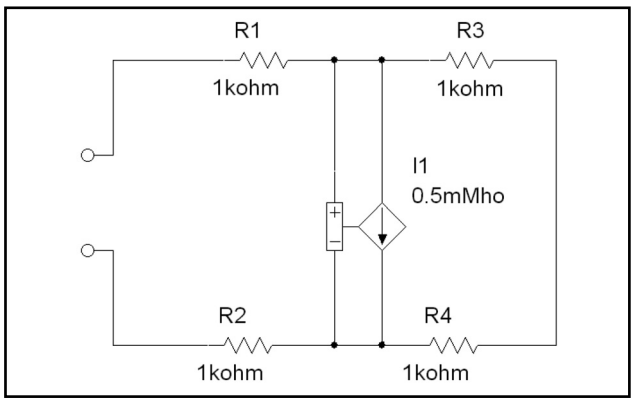
Задача 5.116: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



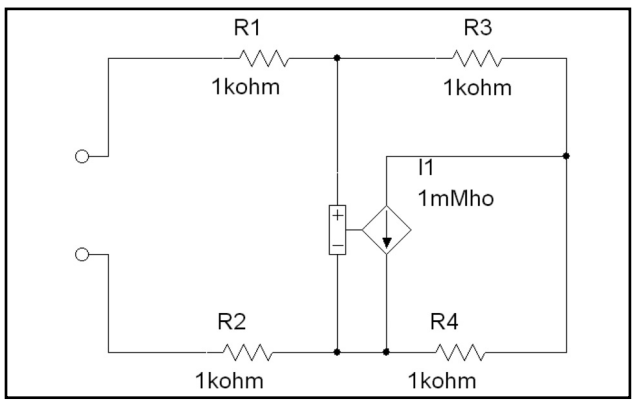
Задача 5.117: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



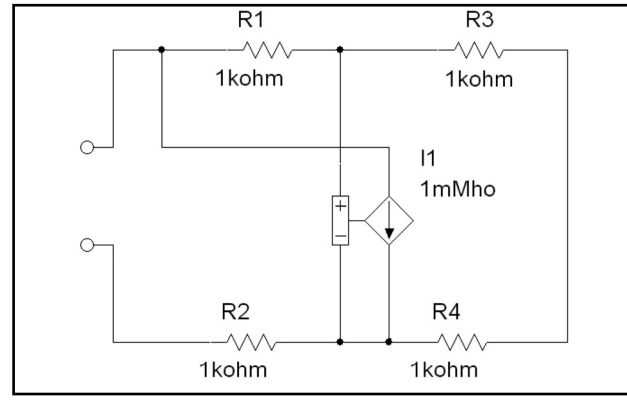
Задача 5.118: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



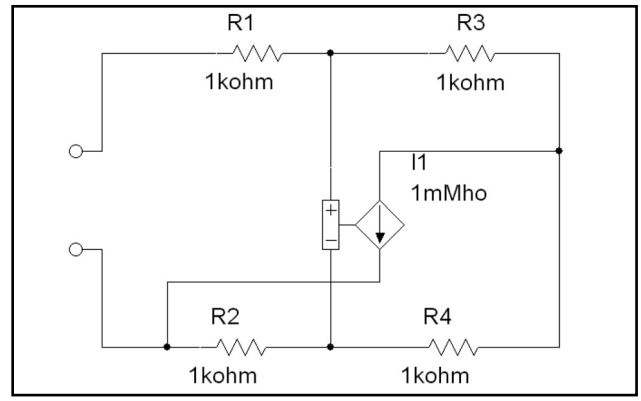
Задача 5.119: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



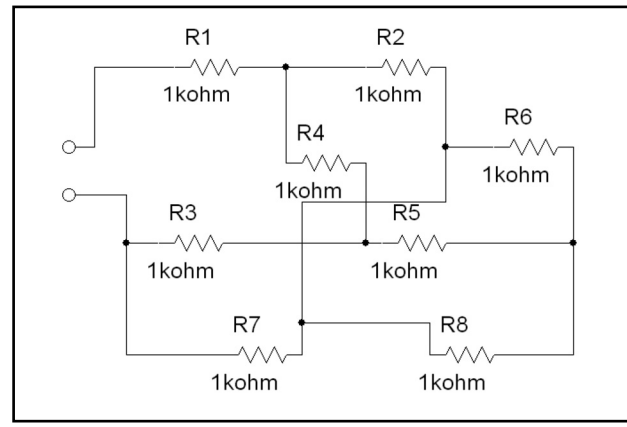
Задача 5.120: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



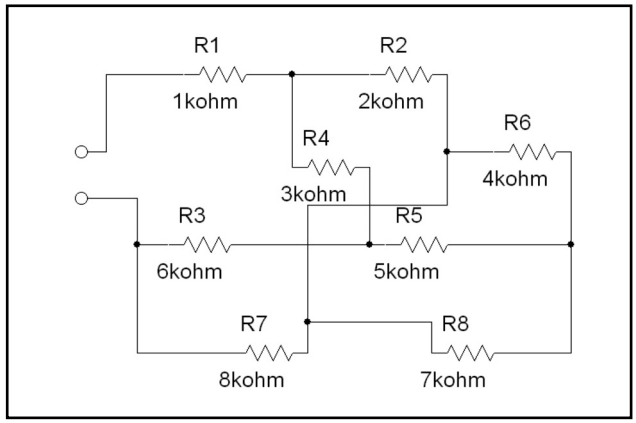
Задача 5.121: Используя мультиметр, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



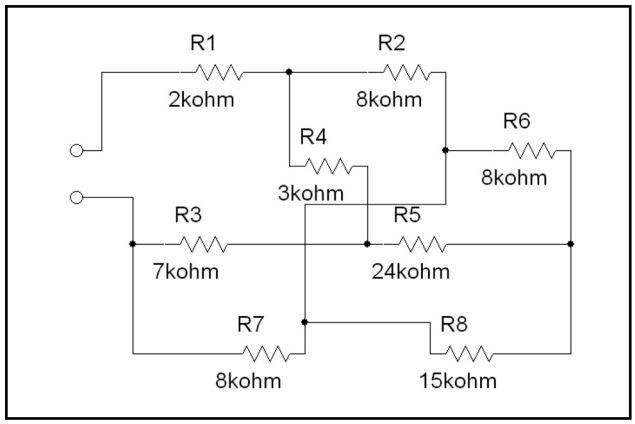
Задача 5.122: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



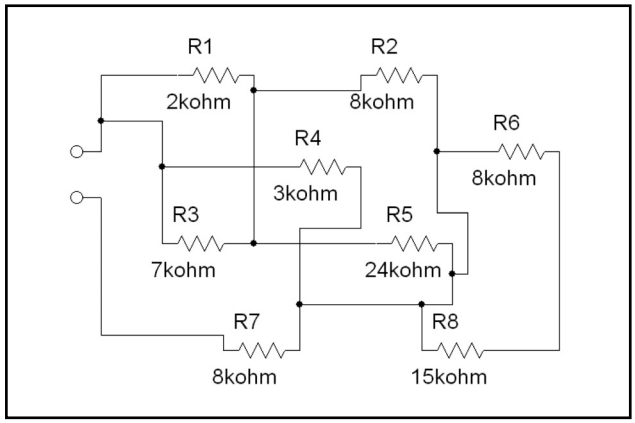
Задача 5.123: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



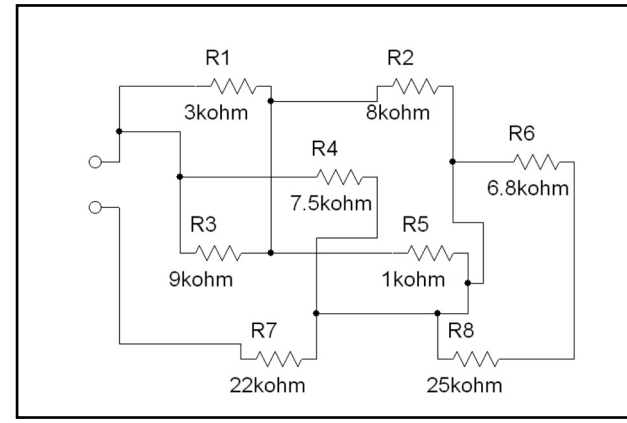
Задача 5.124: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



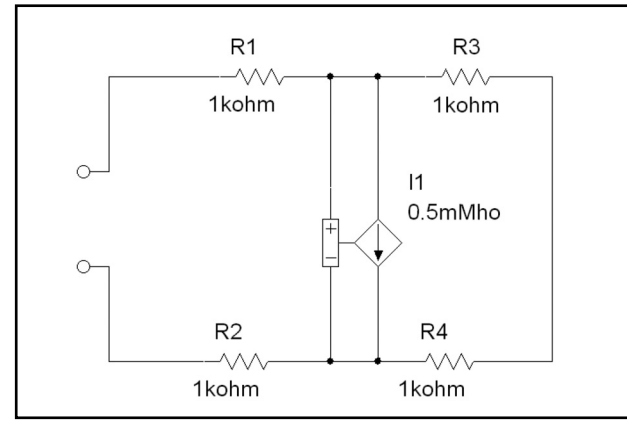
Задача 5.125: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



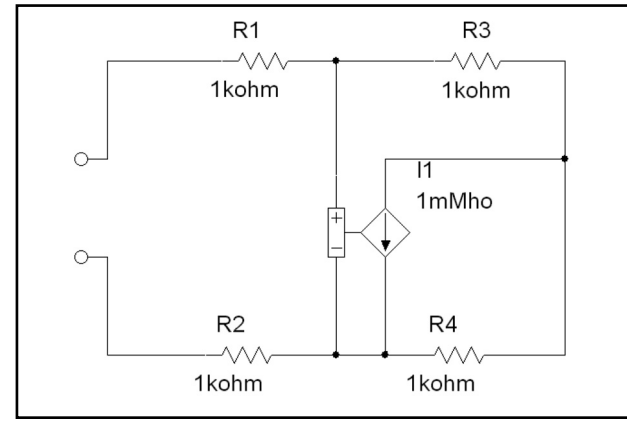
Задача 5.126: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



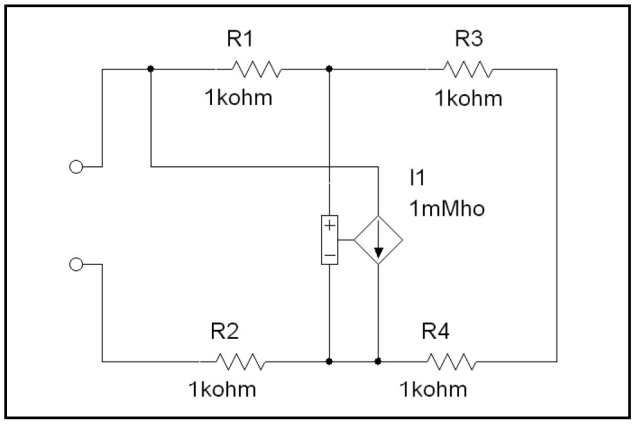
Задача 5.127: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



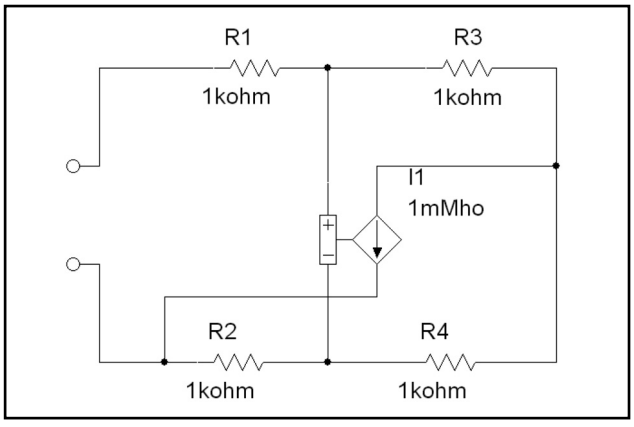
Задача 5.128: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



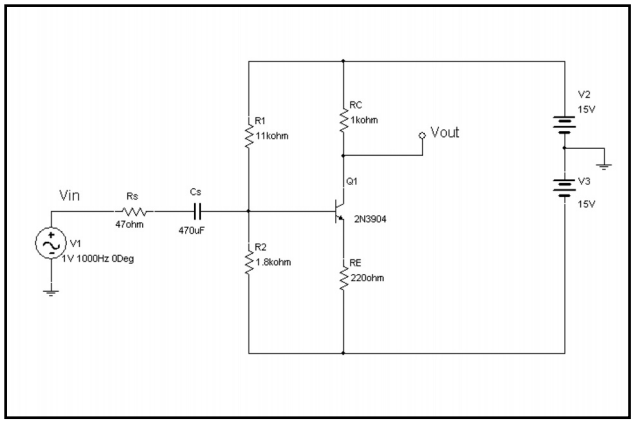
Задача 5.129: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



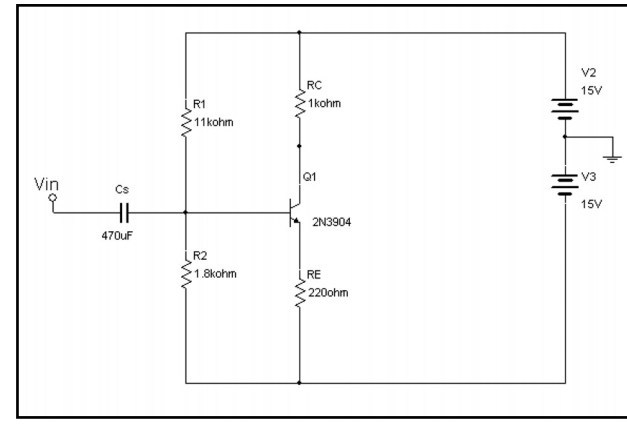
Задача 5.130: Используя функцию **AC Sweep Analysis**, определите сопротивление в схеме, показанной ниже:



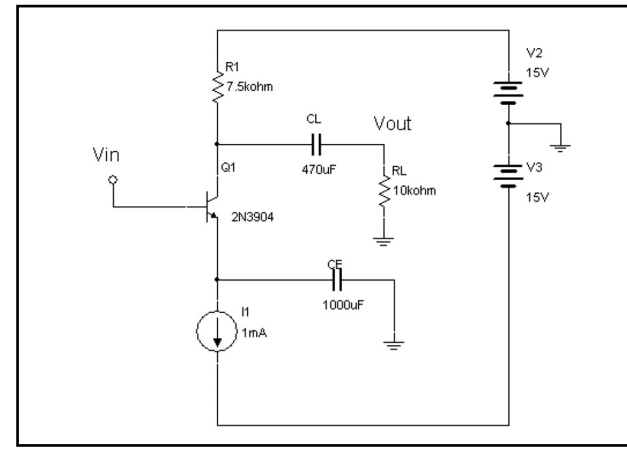
Задача 5.131: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{OUT} и заземлением в схеме, показанной ниже:



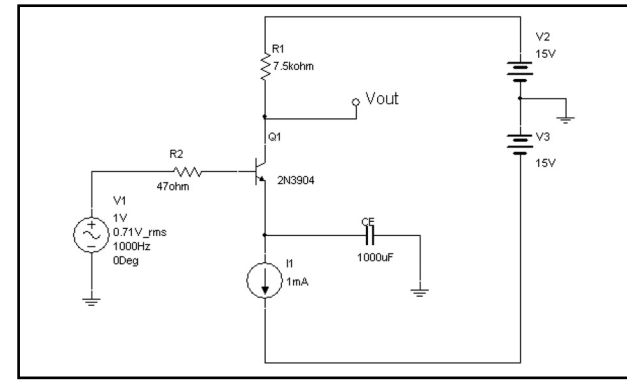
Задача 5.132: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{IN} и заземлением в схеме, показанной ниже:



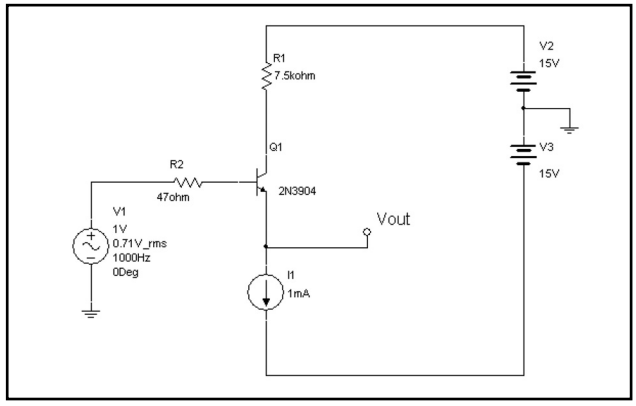
Задача 5.133: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{IN} и заземлением в схеме, показанной ниже:



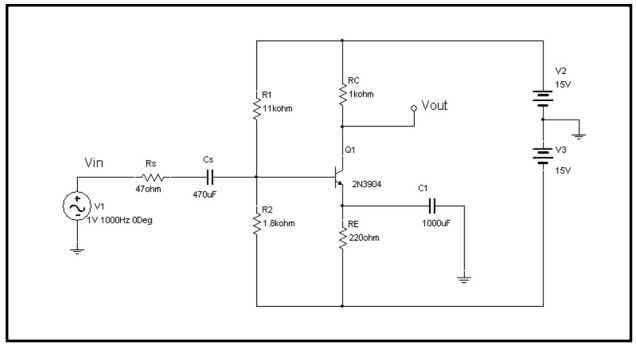
Задача 5.134: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{OUT} и заземлением в схеме, показанной ниже:



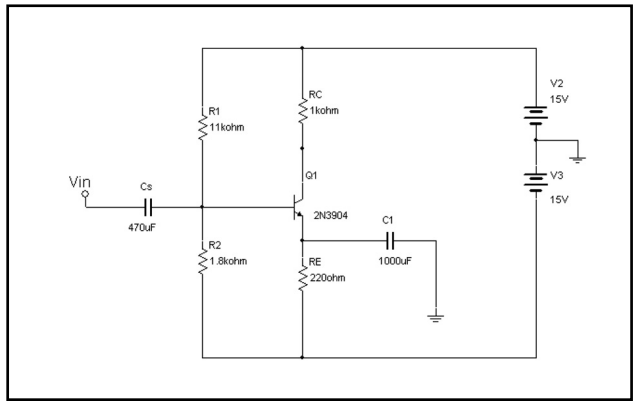
Задача 5.135: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{OUT} и заземлением в схеме, показанной ниже:



Задача 5.136: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{OUT} и заземлением в схеме, показанной ниже:

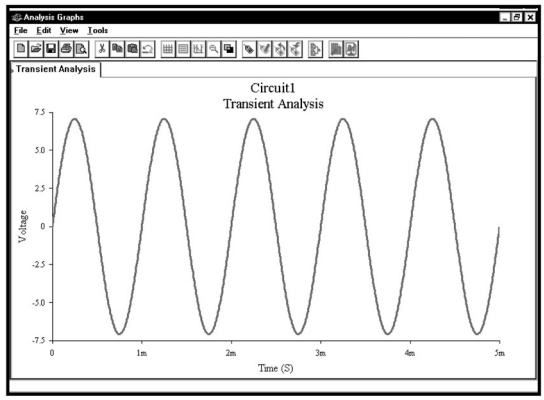


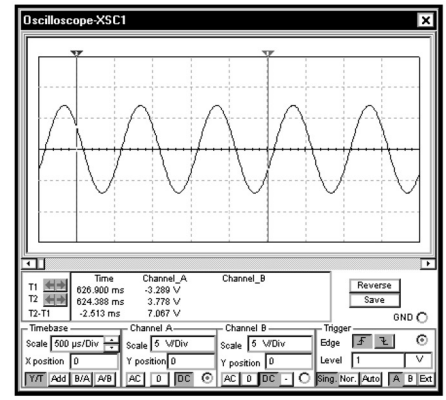
Задача 5.137: Используя функцию SPICE **AC Analysis**, определите полное выходное сопротивление для переменного тока между узлом V_{IN} и заземлением в схеме, показанной ниже:



ГЛАВА 6
Анализ во временной области

Анализ во временной области применяется для того, чтобы отображать диаграммы во времени. Программа Multisim предлагает два метода выполнения анализа во временной области: моделирование с помощью прибора **Oscilloscope (Осциллограф)** и стандартный анализ переходных процессов — SPICE **Transient Analysis**. Благодаря этим функциям временные диаграммы отображаются на экране так же, как если бы их просматривали на экране осциллографа. С помощью осциллографа Multisim с диаграммами можно работать так же, как с настоящим осциллографом. Для просмотра кривых следует правильно настроить параметры. Работая с осциллографом Multisim, можно одновременно отображать на экране несколько периодов диаграммы, но, как правило, всю диаграмму сразу не видно. При использовании функции SPICE **Transient Analysis** можно отобразить всю диаграмму или ее часть. Чтобы просмотреть результаты анализа переходных процессов, не нужно изменять настройки. Примеры диаграмм, полученных с помощью анализа **Transient Analysis** и виртуального осциллографа, показаны ниже:

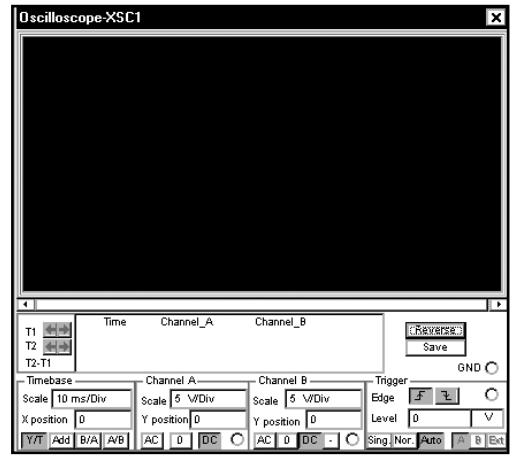




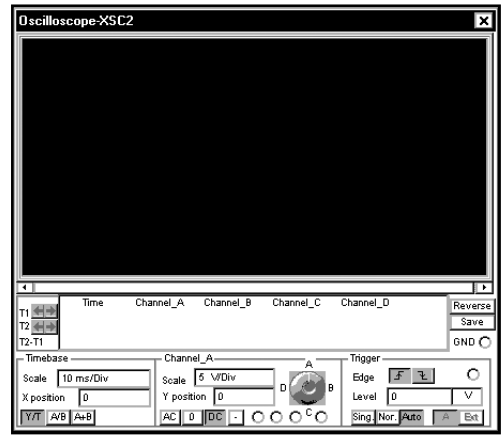
Эти графики показывают временные диаграммы напряжения. Если нужно получить подобную диаграмму, применяют функцию **Transient Analysis**. Уравнение для этой временной диаграммы выглядит как $v_x(t) = 5\sin(2\pi \cdot 1000t + 0^o)$. Оно представляет гармоническое колебание с амплитудой 5 В и частотой 1000 Гц (диаграмма слева). Если вас интересуют модуль и фаза напряжения и тока, используйте функцию AC Sweep или прибор Боде-плоттер. Модуль напряжения для этой диаграммы (диаграмма справа) составляет 5 В действующего значения, а фаза равна 0°, комплексное напряжение записывается как $5\angle 0^o$. Функция AC Sweep или инструмент Bode Plotter дают результат $5\angle 0^o$. Графики были сформированы с помощью анализа Transient Analysis и инструмента Oscilloscope.

6.1. Использование виртуального осциллографа

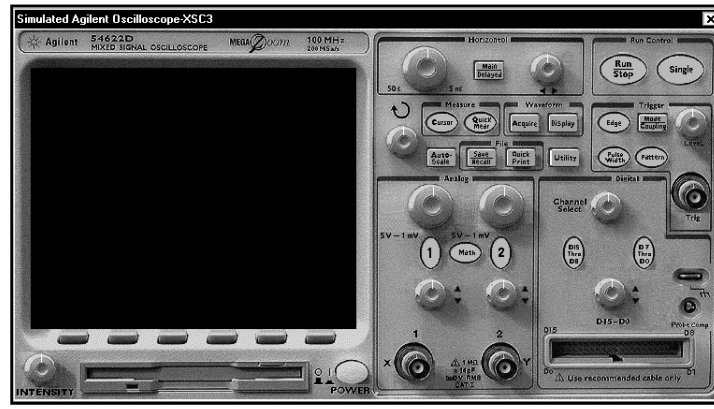
В программе Multisim 7 доступны три разных осциллографа — стандартный двухканальный осциллограф:



четырехканальный осциллограф:



и осциллограф Agilent 54622D:



Двух- и четырехканальные осциллографы работают практически одинаково и отличаются только количеством каналов. Осциллограф Agilent работает так же, как и обычный лабораторный осциллограф (и имеет такой же интерфейс). Это значит, что его использование несколько отличается от использования двух- и четырехканальных осциллографов. Осциллограф Agilent имеет свою специфику и может быть полезен только в том случае, если вы пользуетесь лабораторным осциллографом. В последующих разделах будет рассказано о двухканальном осциллографе. Все приведенные здесь примеры могут быть созданы и с помощью четырехканального осциллографа.

Настройки виртуальных осциллографов напоминают настройки обычного лабораторного. Их основные параметры — это: время по горизонтальной оси, напряжение в вольтах по вертикальной оси и синхронизация. Если вы умеете пользоваться лабораторным осциллографом, то уже знакомы с этими настройками. Обратите внимание на то, что инструмент **Oscilloscope** в программе Multisim не имеет кнопки **Auto-Set (Автоматическая настройка)** или **Auto-Scale (Автоматическое масштабирование)**. Если вы не знакомы с обычным осциллографом, изучение этого инструмента в программе Multisim позволит научиться работе с ним.

Начнем с простой схемы и покажем, как создать осциллограмму:

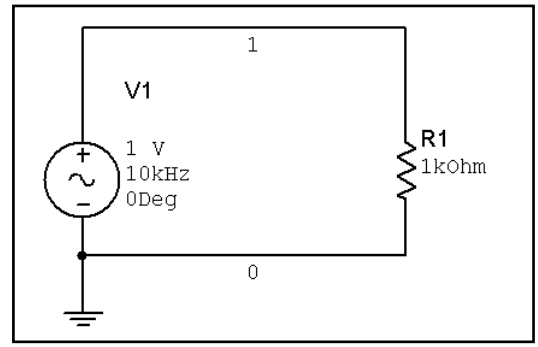
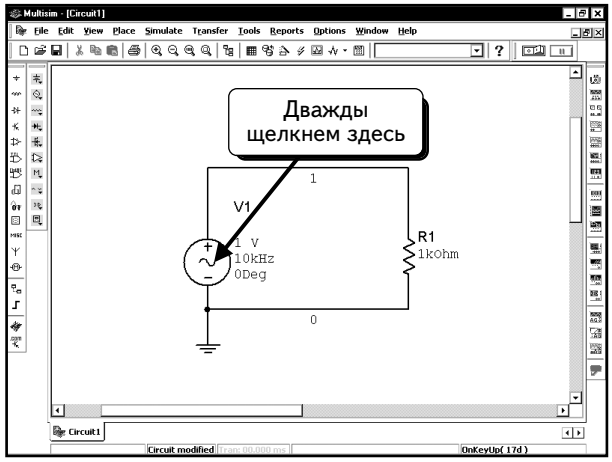
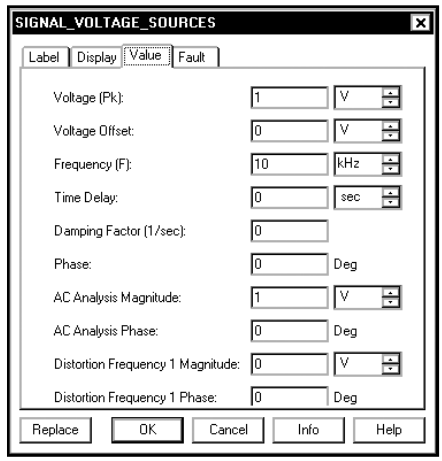
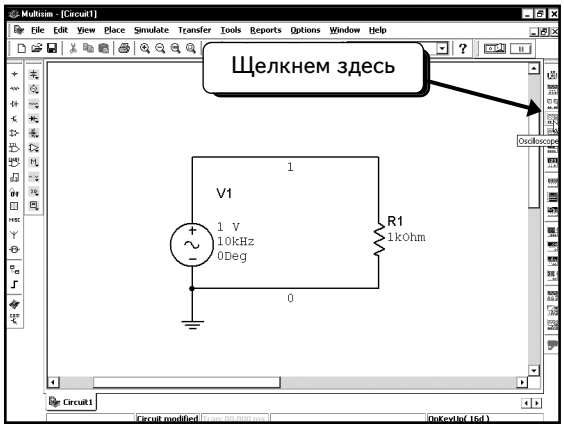


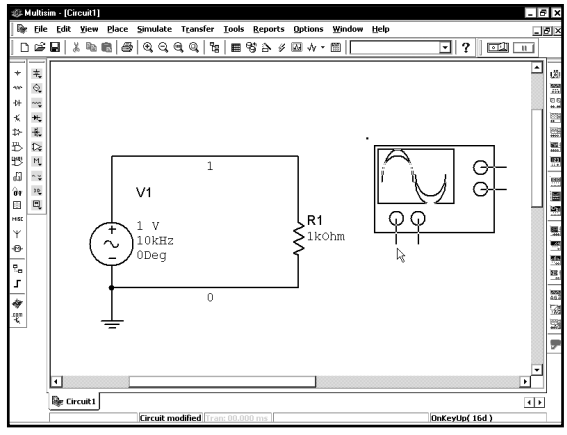
Схема содержит источник переменного напряжения и виртуальный резистор. Значение резистора для нас не важно. Так как источник идеальный, резистор не будет влиять на его напряжение. Резистор лишь рассеивает мощность. Амплитуда источника составляет 1 В, а его частота равна 10 кГц. Чтобы изменить параметры источника, дважды щелкнем по его иконке:



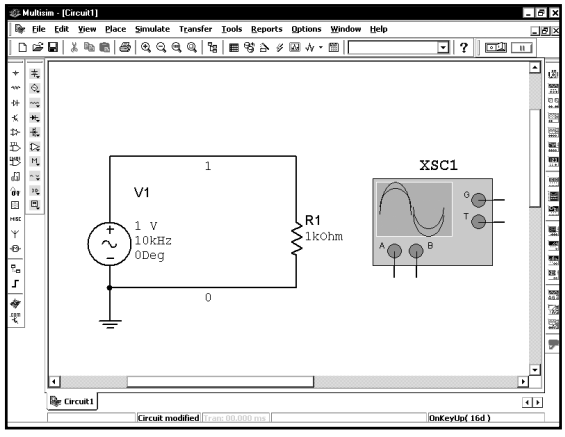


Настроим параметры источника напряжения, как показано ниже. Заземлим схему и подключим к ней осциллограф. Нажмем кнопку **Oscilloscope** . Инструмент будет «привязан» к курсору мыши:

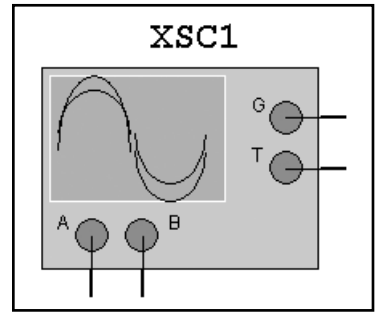




Подключим осциллограф к схеме:



Рассмотрим входы осциллографа подробнее:

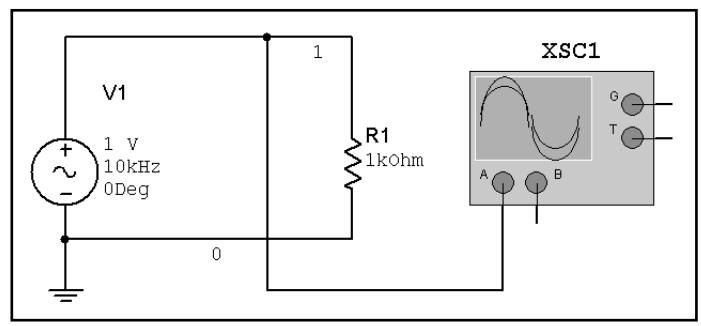


A, B, G и **T** — это выводы осциллографа, к которым можно подключать другие компоненты. Вывод заземления (**G**) позволяет подключать осциллограф к заземлению. Большинство лабораторных осциллографов заземляется с помощью трехполюсной вилки, которую вставляют в сеть. Все пробники осциллографа имеют измерительный щуп (measuring pin) и клемму заземления (ground clip). Так как осциллограф заземляется через вилку и измеряет напряжение относительно земли, не нужно устанавливать клемму заземления на щуп. Однако стоит отметить, что наличие клеммы заземления позволяет снизить уровень шумов. Многие осциллографы оснащаются дополнительным кронштейном. Обычно этот кронштейн представляет собой крепление для провода или разъем для подключения контакта. С помощью данного контакта можно заземлить осциллограф другим способом. Как правило, это не приходится делать, так как осциллограф заземляется через вилку. Контакт **G** осциллографа в программе Multisim является полным аналогом контакта заземления стандартного осциллографа. Если не подключить контакт **G**, осциллограф все равно будет заземлен, и можно измерять напряжение относительно земли. Это значит, что подключение контакта **G** осциллографа не повлияет на работу схемы. Как и лабораторные осциллографы, осциллограф в программе Multisim заземляется автоматически.

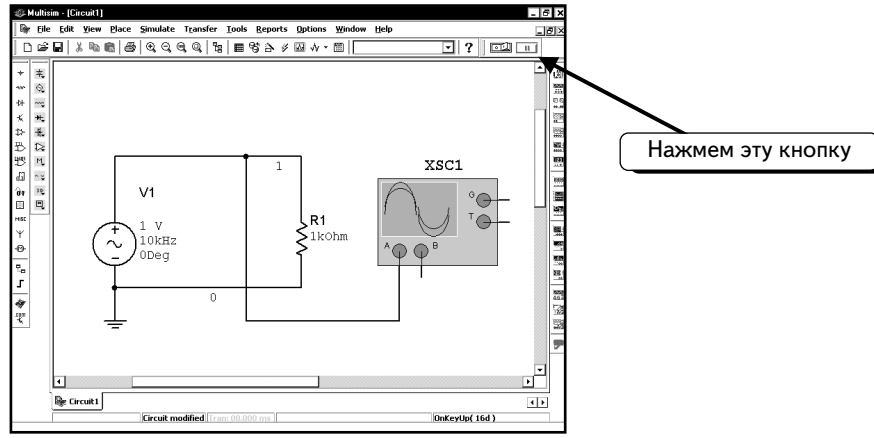
Выводы **A** и **B** представляют собой сигнальные входы осциллографа. Они подключаются к схеме, и напряжения, которые они измеряют, отображаются на экране осциллографа. Лабораторные осциллографы используют входные делители напряжения с коэффициентом деления 10:1 с измерительными щупами и клеммами заземления. Осциллограф Multisim не имеет измерительных щупов и клемм заземления. Для лабораторного осциллографа эти устройства необходимы, так как они снижают уровень шумов и позволяют отображать высокочастотные осциллограммы. Однако щупы и клеммы заземления не нужны в модели Multisim, потому что модель дает возможность выполнить точные измерения без их помощи. Поэтому осциллограф Multisim имеет только один контакт **A** и один контакт **B**. Если подключить любой вход к узлу в схеме, то инструмент отобразит напряжение данного узла относительно земли. Процедура очень похожа на работу с лабораторным осциллографом, за исключением того, что у нас нет измерительного щупа с коэффициентом деления 10:1 и не нужно подсоединять клемму заземления.

Вывод **T** — это вход внешней синхронизации осциллографа, который моделирует аналогичный вход лабораторного осциллографа. Обычно осциллографы создают сигналы синхронизации с помощью сигналов, измеряемых на каналах **A** или **B**. При работе с сигналами высокого уровня можно без проблем использовать канал **A** или **B** в качестве запускающего; но при измерении небольших сигналов могут возникнуть сложности с созданием сигнала синхронизации, и в результате осциллограммы будут беспорядочно перемещаться по экрану. Чтобы избежать этого, воспользуемся каналом внешней синхронизации (**T**). Даже если напряжение на входах **A** и **B** незначительно, сигнал на входе синхронизации будет достаточно высоким. Сигнал синхронизации должен быть синхронизирован с напряжениями на входах **A** и **B**, но иметь намного более высокое значение, чтобы легко осуществлять синхронизацию. В этой главе не будут применяться сигналы синхронизации, так как все измеряемые сигналы достаточно высоки.

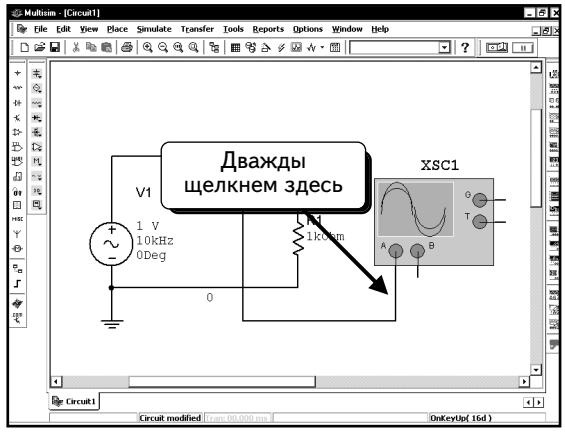
Сначала измерим напряжение источника с помощью канала **A**. Подключим к схеме осциллограф, как показано ниже:

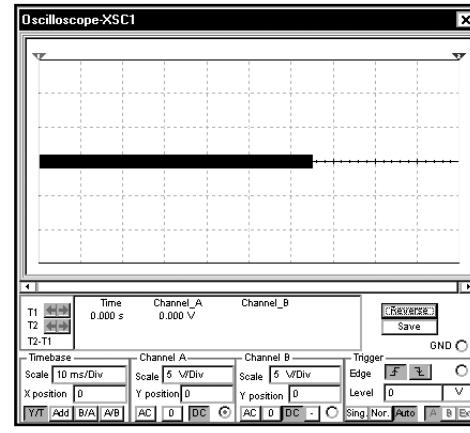


Помните о том, что осциллограф заземляется по умолчанию. Чтобы выполнить моделирование, нажмем кнопку ***Run/stop simulation*** :



Моделирование началось, но мы ничего не увидим, пока не откроем окно осциллографа. Дважды щелкнем по инструменту **Oscilloscope**:

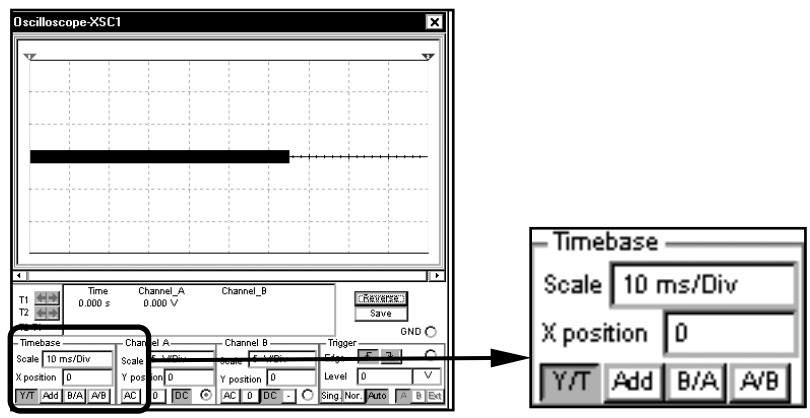




Окно вашего осциллографа в зависимости от настроек может выглядеть и по-другому. Но если привести все настройки в сооответствие с показанными выше, мы увидим то же самое изображение.

6.1.1. Временная развертка

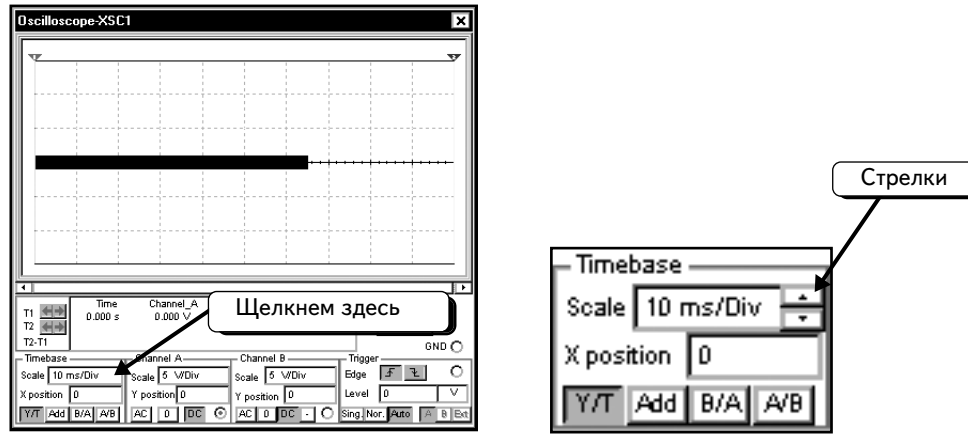
Сначала изменим временную развертку (**Timebase**). Сейчас осциллограф настроен на значение **10 ms/div (мс/дел.)**:



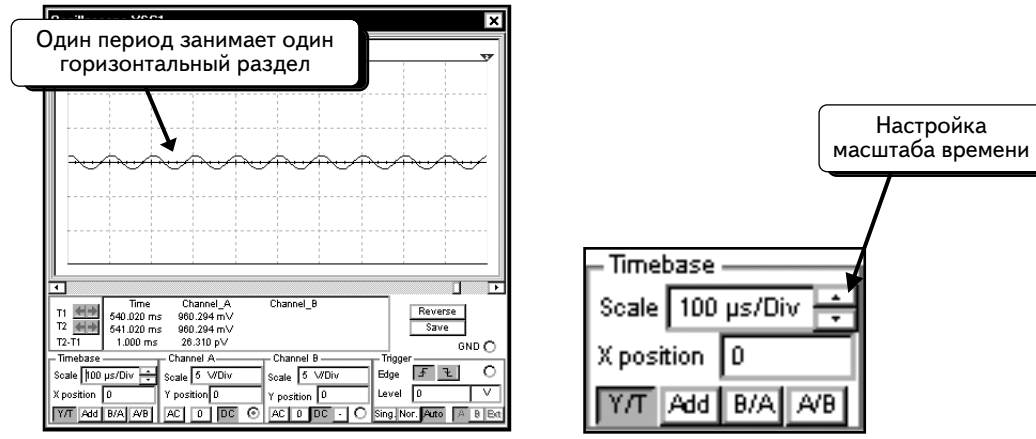
Отметим, что нажата кнопка **Y/T**. Это значит, что горизонтальная ось представляет собой ось времени и все диаграммы являются временными. Сигнал канала **A** и/или **B** откладывается по оси y. Масштаб оси времени равен **10** мс/дел.

Сигнал, который надо измерить, имеет частоту 10 кГц. Период сигнала является величиной, обратной частоте, следовательно, период сигнала составляет 0,1 мс, или 100 мкс. Период сигнала определяет время его повторения. Так как параметр **Timebase (Временная развертка)** настроен на 10 мс/дел., а сигнал повторяется через 0,1 мс, каждое деление горизонтальной оси содержит 100 периодов колебания. Поэтому кажется, что осциллограмма на экране представляет собой сплошную линию.

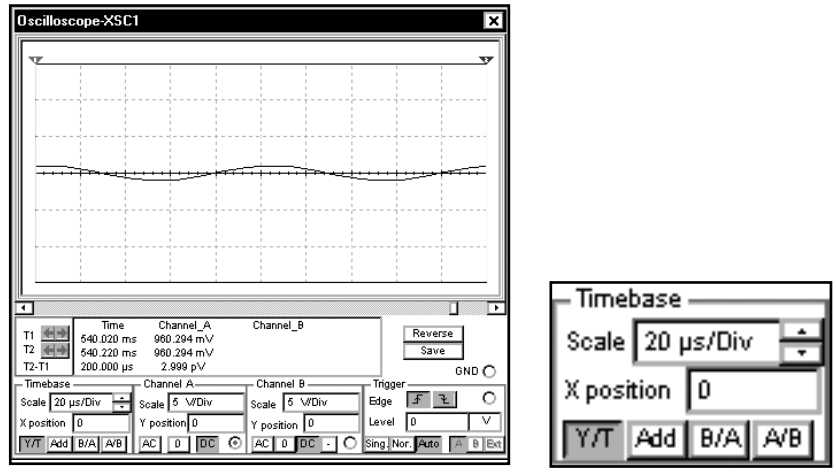
Предположим, что нужно установить время одного колебания равным одному делению горизонтальной шкалы (то есть период должен вписываться в квадрат). Период равен 0,1 мс, следовательно, надо изменить настройку параметра **Timebase** на 100 µs/div (мкс/дел.). Для этого щелкнем по полю **Scale (Масштаб)**. В поле появится курсор; кроме того, рядом с полем появятся стрелки:



Можно щелкнуть по стрелкам и изменить настройки либо воспользоваться клавиатурой (↓ ↑). Изменим зна-



чение на 100 µs/div (мкс/дел.), но не на 100 ms/div (мс/дел.). Воспользуемся клавиатурой ↓:
Можно изменить значение параметра **Timebase** в соответствии с вашими предпочтениями. Ниже представлены два периода колебания:

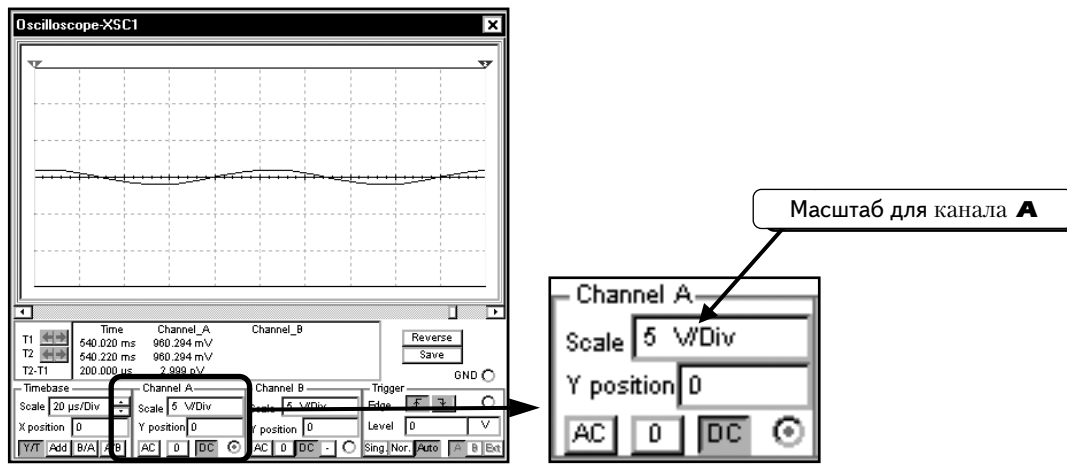


О кнопках **Add**, **B**/**A** и **A**/**B** будет рассказано позднее.

6.1.2. Настройка масштаба напряжения для каналов A и B

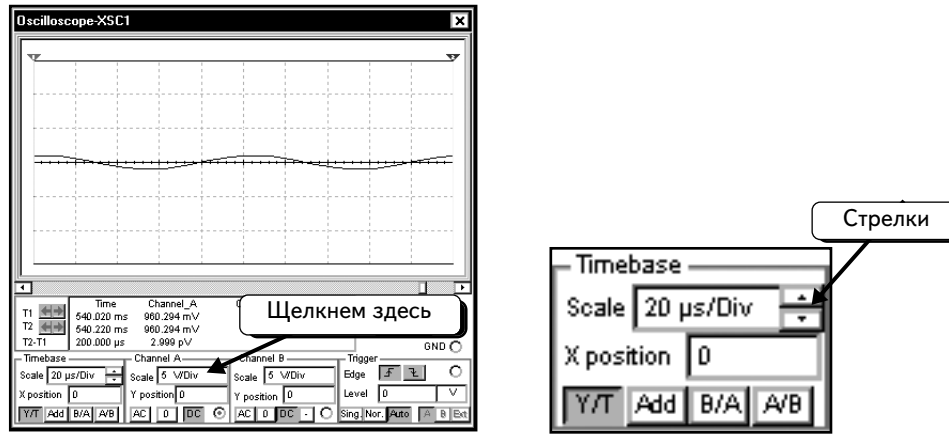
Эта настройка производится одинаково для каналов **A** и **B**, поэтому ограничимся описанием настройки для канала **A**.

Получим осциллограмму гармонического напряжения с амплитудой 1 В. Это значит, что максимальное положительное значение сигнала составляет +1 В, а минимальное отрицательное значение равно –1 В. Настроим масштаб напряжения для канала **A** на **5V/Div** (В/дел.). Вид осциллограммы при такой настройке показан ниже:

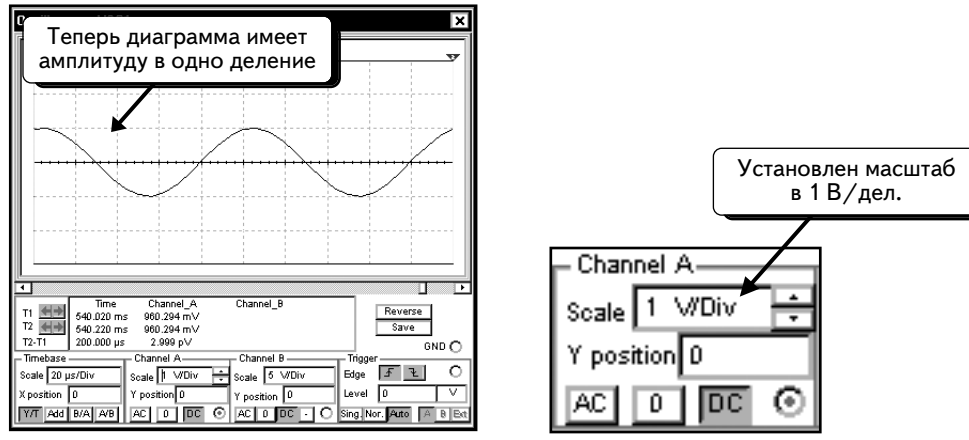


Напряжение канала **A** отображается по вертикальной оси (или оси y). При использовании масштаба **5V/Div** каждое деление на вертикальной оси содержит 5 В. Так как сигнал имеет амплитуду 1 В, он занимает только 1/5 часть квадрата по вертикали.

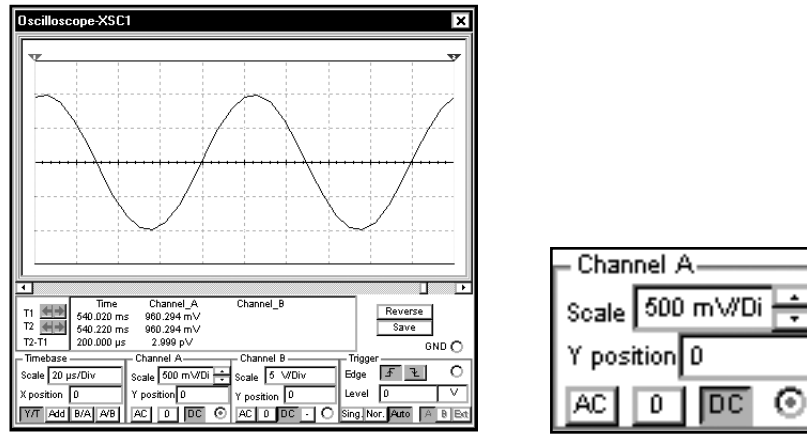
Чтобы осциллограмма выглядела более крупной, нужно изменить масштаб напряжения для канала **A**. Если хотим, чтобы осциллограмма занимала один квадрат как в положительном, так и в отрицательном направлении, следует настроить данный параметр на **1 V/div**(В/дел.). Для этого щелкнем по полю **Scale**. В нем появится курсор, кроме того, рядом с полем появятся стрелки:



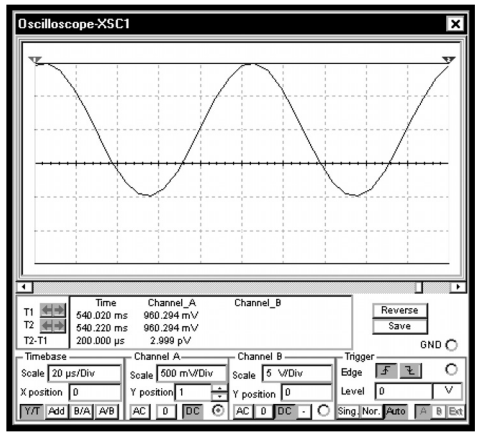
Можно щелкать по стрелкам или пользоваться клавиатурой (↑ ↓). Изменим значение на **1 V/div**. Можно воспользоваться также стрелкой вертикального перемещения ↓ на клавиатуре:

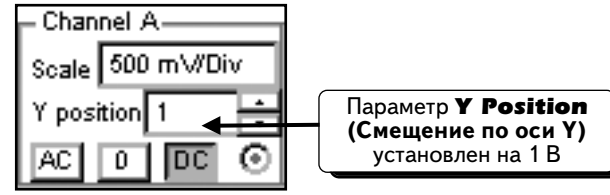


Можно изменить масштаб с помощью опции **Scale**. Осциллограмма в масштабе 500 мВ/дел. показана ниже:

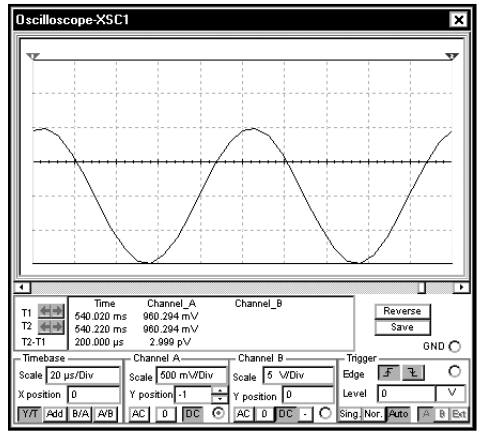


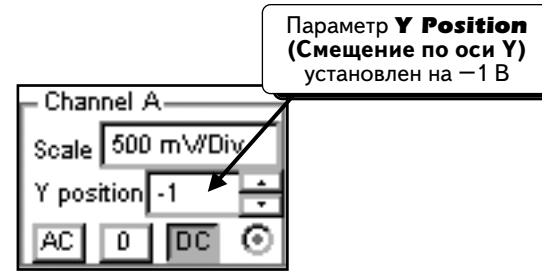
Поле **Y Position (Смещение по оси y)** является аналогом регулятора стандартного осциллографа; оно позволяет перемещать осциллограмму по экрану. Например, при изменении значения на 1 нулевая линия осциллограммы переместится на одно деление вверх:





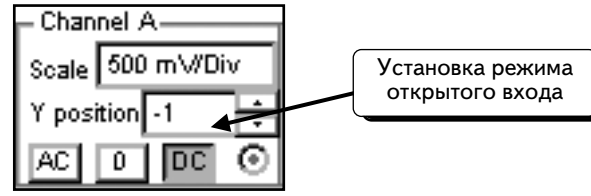
При изменении значения на −1 осциллограмма переместится на одно деление вниз:





Регулятор положения и опция **Y Position** в программе Multisim дают возможность перемещать осциллограммы. При работе с одной кривой опция **Y Position** обычно равна нулю. Если используют каналы **A** и **B**, можно разделить кривые и применить опцию **Y Position**, чтобы расположить их на экране нужным образом.

Кнопки **AC**, **0** и **DC** используются для настройки каналов осциллографа:



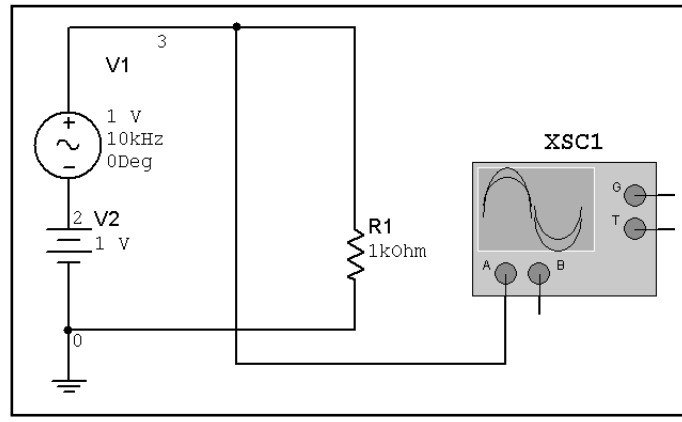
Они являются аналогами кнопок AC, 0 и DC обычного осциллографа. При настройке значения для канала на ноль (или при подключении заземления на обычном осциллографе) входной сигнал канала тоже будет равен нулю, даже если этот канал подключен к узлу и измеряет напряжение. В результате канал осциллографа будет постоянно показывать напряжение **0** В.

Далее, с помощью опции **Y Position** можно переместить кривую, показывающую нулевое значение. Параметр **DC** отобразит осциллограмму полностью. Если измеряется осциллограмма постоянного или переменного тока, она будет показана. Если измеряется напряжение, которое имеет переменную и постоянную составляющие, осциллограф отобразит как переменную составляющую, так и смещение.

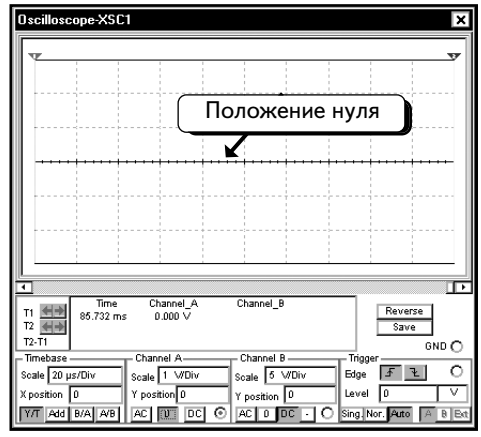
Выбор режима **AC** равносилен введению емкостного фильтра в цепь сигнала, при этом отображается только переменная составляющая колебания. Если измеряется напряжение постоянного тока, осциллограф покажет нулевое значение.

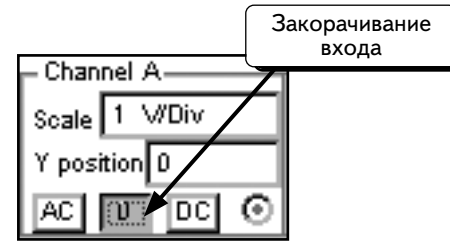
Если измеряется напряжение, которое содержит постоянную и переменную составляющие, то будет показана только переменная составляющая.

Чтобы продемонстрировать различие между этими режимами, включим в схему источник постоянного тока:



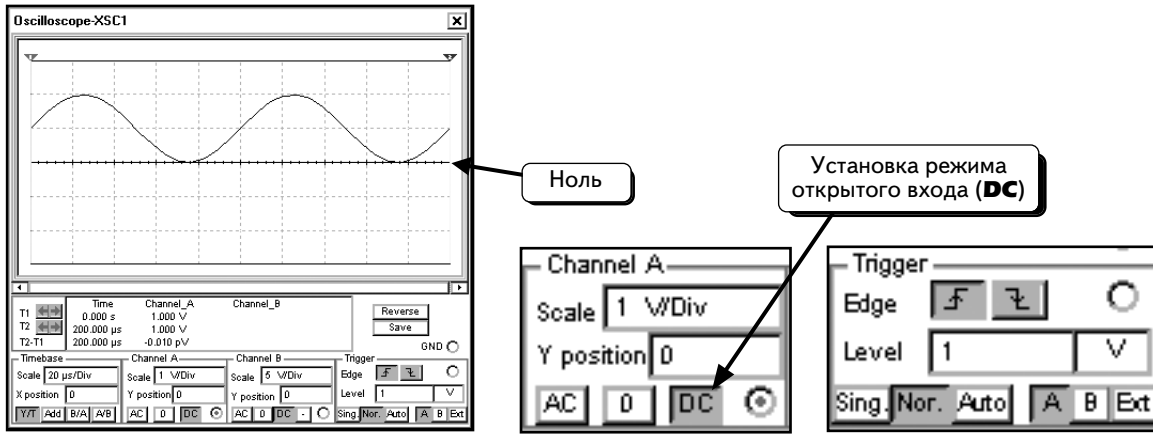
Так как источники подключены последовательно, их напряжения суммируются. Таким образом, осциллограф будет измерять постоянное напряжение 10 В, а также гармоническое напряжение с амплитудой 1 В и частотой 1 кГц. Отобразим эту диаграмму на осциллографе. Сначала выберем режим **0**. Это позволит определить положение нулевого значения сигнала:



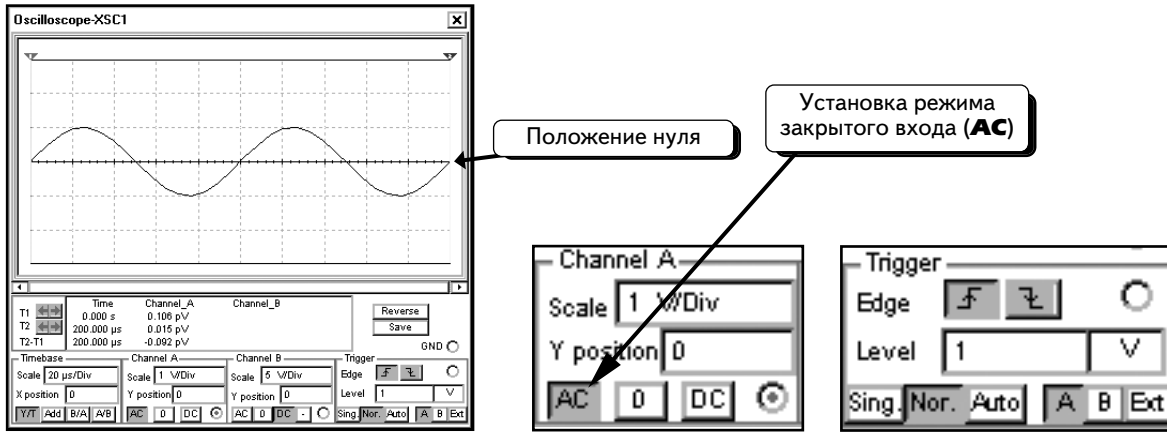


Это трудно увидеть, но теперь нулевое значение располагается точно в центре экрана. Можем изменить смещение **Y Position**, и линия переместится вверх или вниз, как показано в нижней части экрана. Если смещение **Y Position** равно нулю, линия будет находиться в центре экрана. Обратите внимание, что масштаб для канала **A** выбран равным **1V/Div (1 В/дел.)**.

Видно, что когда осциллограф переведен в режим открытого входа, то будет отображаться смещенная гармоника. Ее ось будет находиться на уровне 1 В, а не на нулевом уровне, так как в схему был добавлен источник постоянного напряжения. Масштаб напряжения равен **1 (V/Div) (1 В/дел.)** Чтобы осциллограмма отображалась верно, изменим уровень синхронизации на 1, а режим синхронизации — на **Nor**mal. Как видим, при использовании параметра **DC** осциллограф показывает и постоянную, и переменную составляющие:

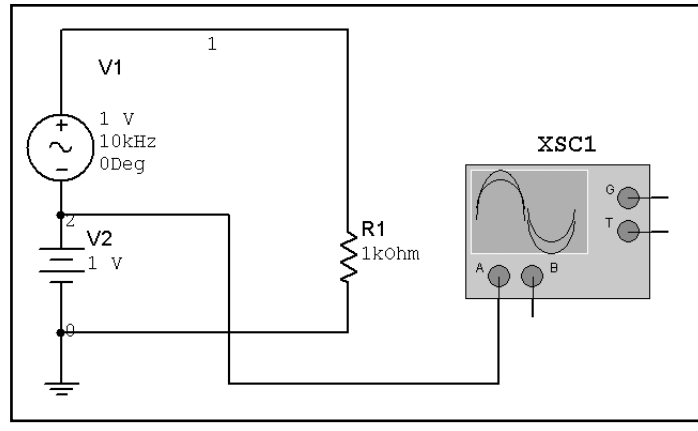


Если выбрать режим **AC**, постоянное смещение исчезнет с экрана. Останется только осциллограмма переменной составляющей с осью в середине экрана:

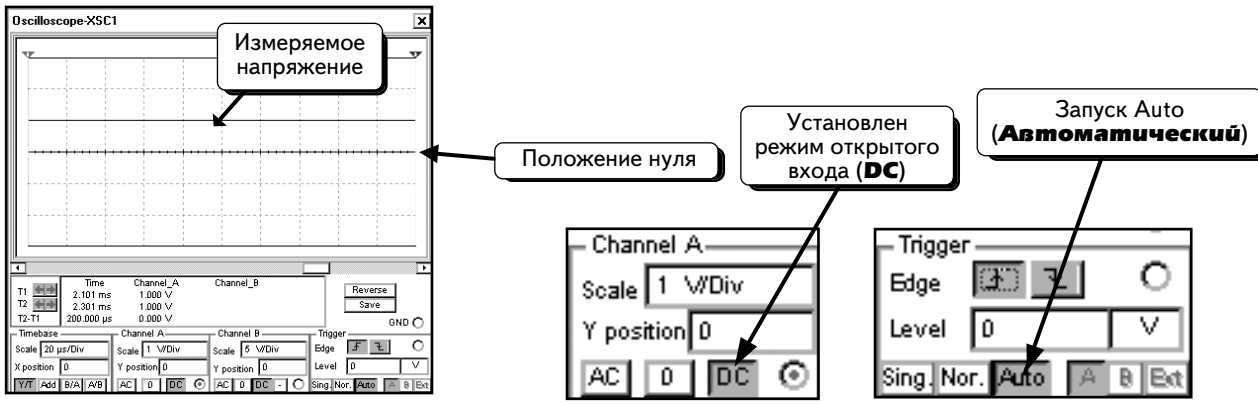


Таким образом, в режиме **DC** отображаются обе составляющих сигнала, а в режиме **AC** — только переменная составляющая.

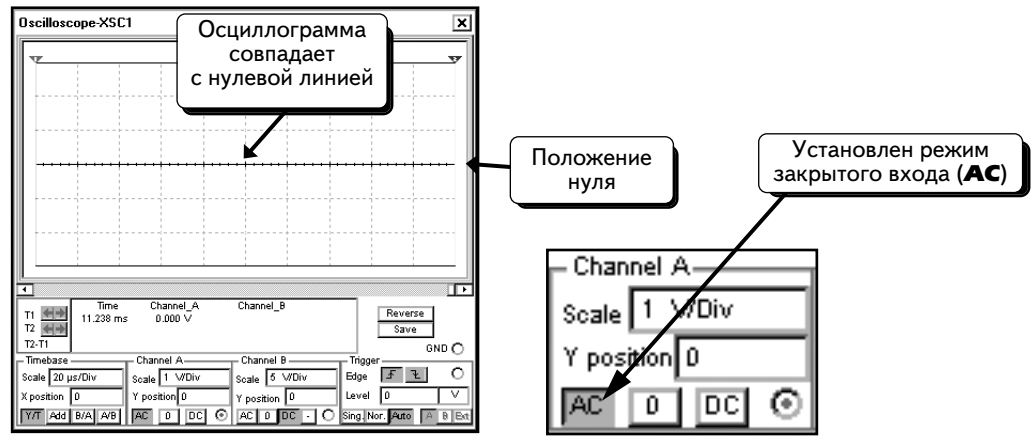
Измерим напряжение источника постоянного напряжения с применением параметров AC и DC. Переключим осциллограф, как показано ниже:



Далее проведем моделирование и изменим настройку на **DC**. Следует настроить режим синхронизации на **Auto**:



На экране видно, что осциллограф показывает постоянное напряжение 1 В. Если изменить режим на **AC**, осциллограф будет игнорировать постоянную часть осциллограммы и отобразит только ее изменяющуюся часть. В данном случае при работе со стандартной осциллограммой постоянного тока осциллограф показывает нулевое значение:



Выбор опции зависит от осциллограммы измеряемого напряжения. Если необходимо измерять постоянное смещение, выбирают режим **DC**, если же требуется работать с изменяющейся частью осциллограммы и не интересует постоянное смещение, то — режим **AC**. В режиме **DC** отображается вся осциллограмма, а в режиме **AC** — только ее изменяющаяся часть.

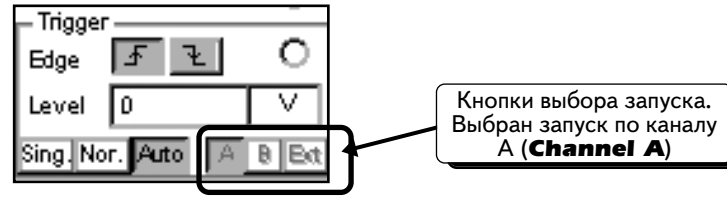
6.1.3. Настройки синхронизации

При работе с лабораторным осциллографом настройка синхронизации — это одна из самых сложных задач. Если осциллограф использует катодную трубку, кривая рисуется на экране с помощью электронного луча. При воздействии электронного луча на экран люминофорное покрытие начинает светиться, в результате чего осциллограмма становится видна пользователю. Можно провести аналогию между электронным лучом и пером, которое рисует кривую на экране. Луч начинает движение слева и перемещается вправо. Опция **Timebase** информирует осциллограф о том, как быстро должна перемещаться кривая. Сигнал на входе A (**Channel A**) определяет, насколько должен луч двигаться вверх и вниз по вертикали. Сигнал синхронизации информирует о том, когда следует начать движение.

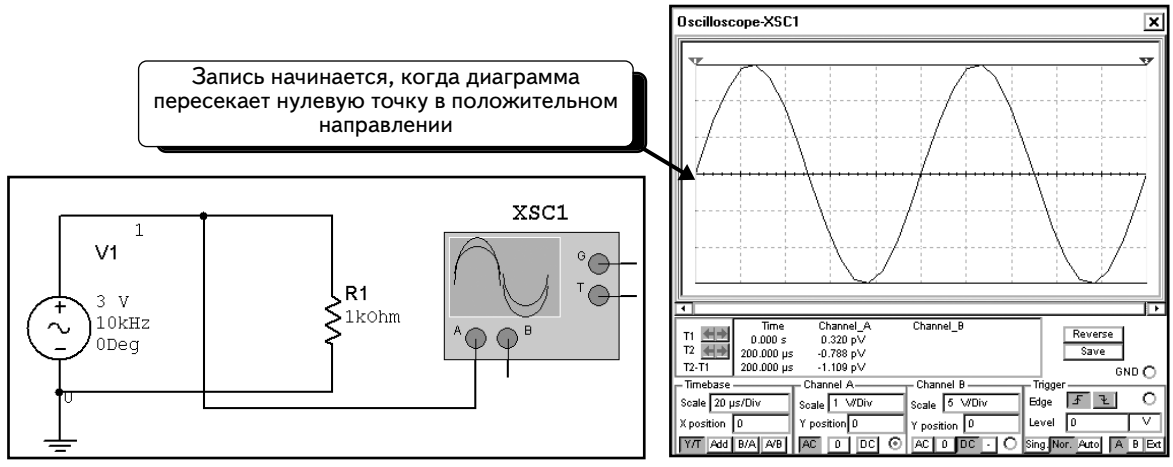
Когда на экране осциллографа рисуется линия, происходит следующее. Луч располагается в левой части экрана и не перемещается, пока осциллограф не получит сигнала синхронизации. После получения сигнала луч начинает движение вправо и рисует на экране видимую линию. Достигнув правой части экрана, луч автоматически перемещается в его левую часть. Затем он останавливается и больше не двигается, пока не получит новый сигнал синхронизации.

Таким образом, сигнал синхронизации сообщает осциллографу о начале рисования кривой. Если осциллограф не получает сигнала синхронизации, то луч не будет перемещаться и осциллограмма не будет нарисована на экране, в результате экран осциллографа останется пустым. Если сигнал синхронизации приходит в случайные моменты времени, которые не синхронизованы с измеряемым сигналом, осциллограмма будет произвольно перемещаться по экрану. Если сигнал синхронизации настроен правильно, осциллограмма будет правильно показана на экране прибора.

Во всех режимах синхронизации осциллограф может использовать опцию **Channel A**, **Channel B** или External Trigger (Внешняя синхронизация). Источник синхронизации выбирают с помощью кнопок, показанных ниже:

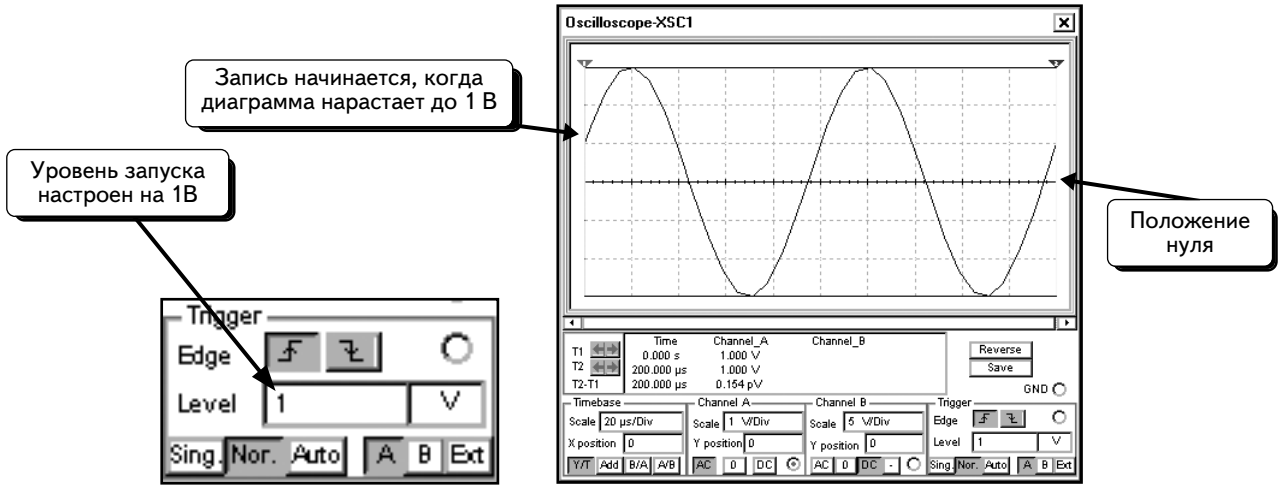


На экране выбран запуск от канала **Channel A**. Опция **Edge (Фронт)** настроена на запуск по фронту сигнала синхронизации [⨍], а уровень сигнала равен 0 В. Осциллограф создает сигнал запуска путем сравнения сигнала на входе **Channel A** и заданного уровня синхронизации. Если входной сигнал пересекает уровень в положительном направлении, это приводит к созданию сигнала синхронизации. Если, как в данном примере, сигнал на канале **A** пересечет точку 0 В в положительном направлении, луч начнет движение слева направо и нарисует на экране кривую. Схема и соответствующая осциллограмма показаны на экране ниже. Обратите внимание: в выбранной схеме амплитуда источника была изменена на 3 В. В этих примерах режим синхронизации показывает опцию **Nor**mal [Nor]:

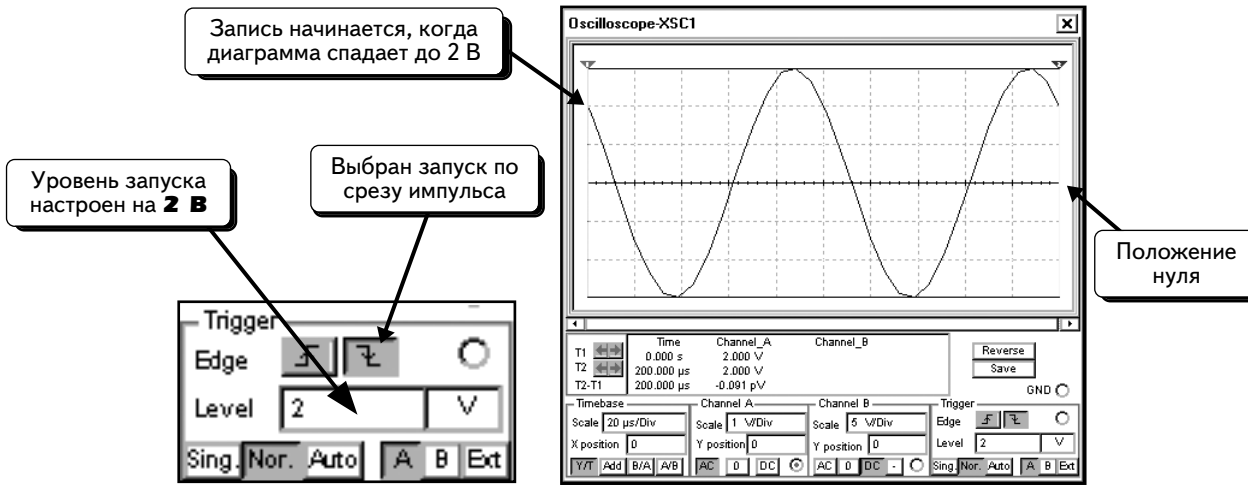


Видно, что кривая рисуется после того, как измеряемый сигнал пересекает нулевую точку в положительном направлении.

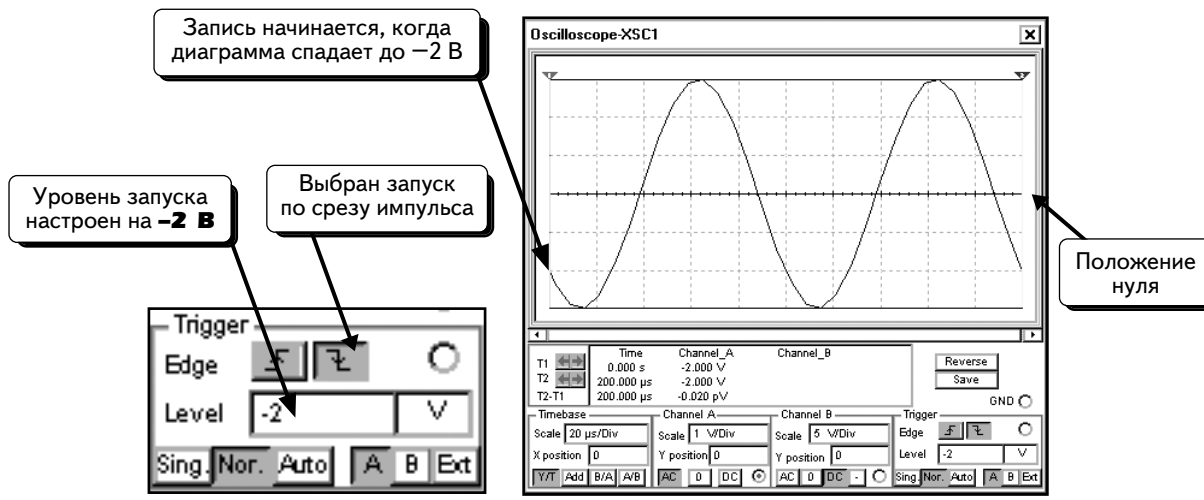
Сохраним все установки, но изменим уровень запуска на **1 В**. В результате сигнал запуска будет создан после того, как измеряемый сигнал пересечет уровень 1 В в положительном направлении:



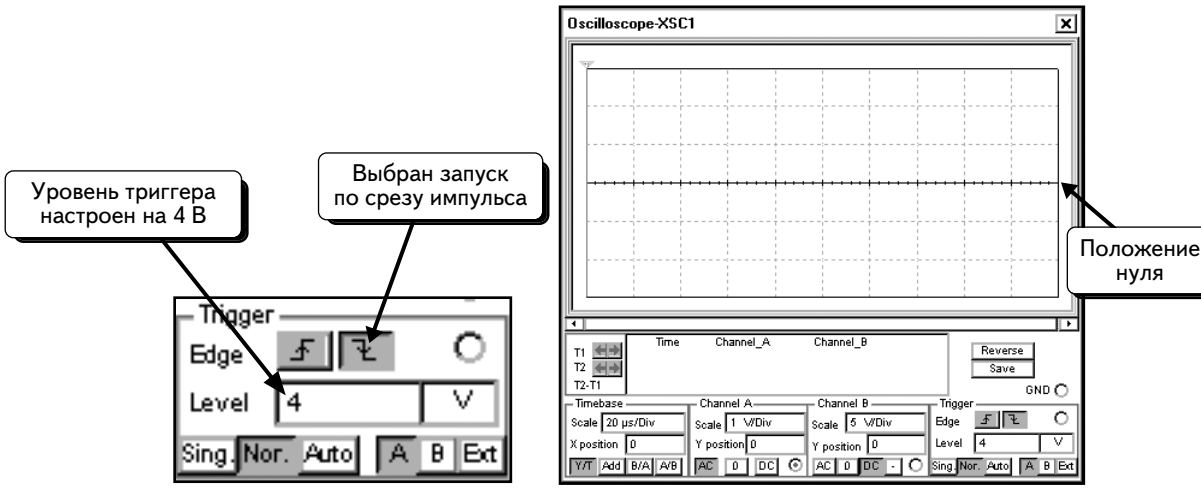
Сохраним все установки, но установим уровень запуска в **2 В**, а значение опции **Edge** — отрицательным . В результате, сигнал запуска будет создан после того, как измеряемый сигнал пересечет **уровень 2 В** в отрицательном направлении:



Если требуется, чтобы кривая начиналась после пересечения отрицательного уровня, то уровень запуска следует настроить на отрицательное значение, например –2 В:



В последнем примере уровень запуска настроен на 4 В. Так как измеряемый сигнал не достигает 4 В, сигнал синхронизации создан не будет. Следовательно, осциллограмма на экране не появится:



Теперь мы знаем, что необходимо уменьшить уровень запуска, чтобы сигнал на канале **A** достигал этого уровня.

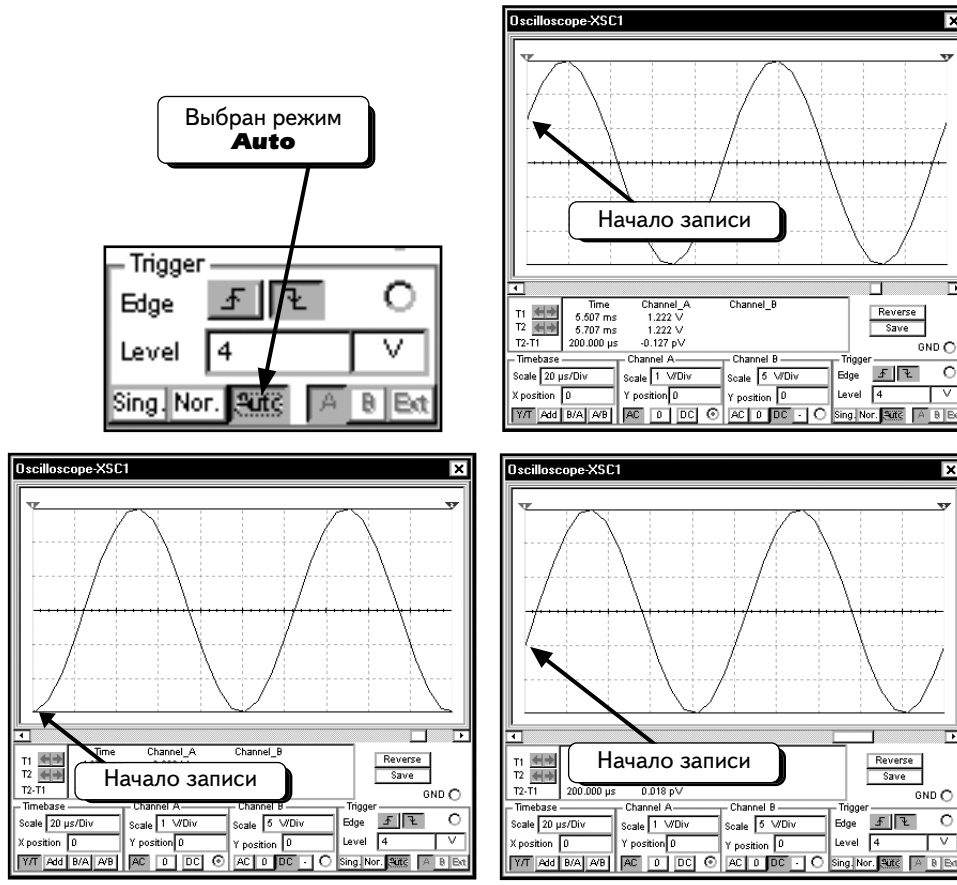
Осциллограф Multisim имеет три режима синхронизации, — **Normal (Обычный)**, **Single (Однократный)** и **Auto (Автоматический)**:

Режим Normal Nor. Во всех предыдущих примерах использовался именно этот режим, при котором луч ожидает сигнала синхронизации, находясь в левой части экрана. Этот сигнал создается напряжением указанного источника (**Channel A, Channel B** или External Trigger) и пересекает уровень запуска. После этого луч перемещается вправо и рисует кривую. Когда он достигает правой части экрана, то возвращается в левую часть и ожидает следующего сигнала синхронизации. В этом режиме осциллограмма на экране неподвижна;

Режим Single Sing. Данный режим работает аналогично режиму **Normal**, за исключением того, что на экране формируется только одна кривая. При активации опции Single Sing. осциллограф переходит в режим ожидания сигнала синхронизации. После получения сигнала синхронизации рисуется кривая, а потом луч отключается. Другие кривые не создаются до тех пор, пока пользователь повторно не активирует режим ожидания запуска, а система не получит сигнал запуска. Обычно этот режим используется при работе с одиночными осциллограммами (например с кривыми импульсов, которые не повторяются).

Если используется аналоговый осциллограф с режимом однократного запуска, то на экране видна одна кривая, которая затем постепенно исчезает по мере того, как люминофорное покрытие перестает светиться. Цифровой осциллограф в режиме однократного запуска применяется для получения одной осциллограммы. После записи осциллограммы программа сохранит ее на экране. Осциллограмма не будет удалена до тех пор, пока не будет снова активирован режим однократного запуска или какой-либо другой режим. До появления цифровых осциллографов существовали аналоговые, которые назывались «запоминающими». Эти осциллографы работали в режиме однократного запуска и позволяли сохранять одиночные осциллограммы на экране. В обычном аналоговом осциллографе одиночные осциллограммы не сохраняются. На запоминающем осциллографе кривая будет показываться на экране столько, сколько необходимо. Режим однократного запуска осциллографа Multisim работает аналогичным образом. Отличие заключается только в форме отображения и сохранения осциллограммы.

Режим Auto Auto. В этом режиме сигнал синхронизации создается автоматически, а не путем сравнения заданного значения и уровня триггера. Во многих осциллографах для создания сигнала синхронизации используется напряжение частотой 60 Гц от источника питания. Момент запуска не синхронизируется с измеряемым сигналом, в результате осциллограмма будет перемещаться по экрану. Получаемая в этом режиме осциллограмма никак не связана с моментом запуска. Это значит, что начальная точка кривой является произвольной и постоянно изменяется. Приведем пример: если в схеме, показанной на с. 327, изменить режим триггера на **Auto** Auto, осциллограмма появится на экране, но ее начальная точка будет произвольной:



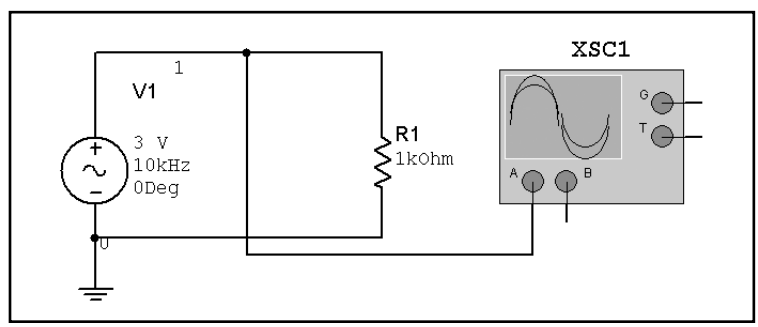
Режим автоматической синхронизации используется в двух случаях. Первый случай — это измерение напряжения постоянного тока. Такое напряжение не изменяется, поэтому измеряемый сигнал не может пересечь уровень запуска, и в режиме обычного или однократного запуска сигнал синхронизации создан не будет. Единственный способ решения проблемы заключается в том, чтобы переключиться в режим автоматического запуска.

Второй случай — это ситуация, в которой осциллограф не может создать сигнал запуска в обычном или одиночном режиме. Здесь следует переключить осциллограф в режим автоматического запуска. В результате осциллограмма появится на экране, после чего станет ясно, как следует изменить уровень синхронизации, чтобы отобразить осциллограмму в обычном режиме.

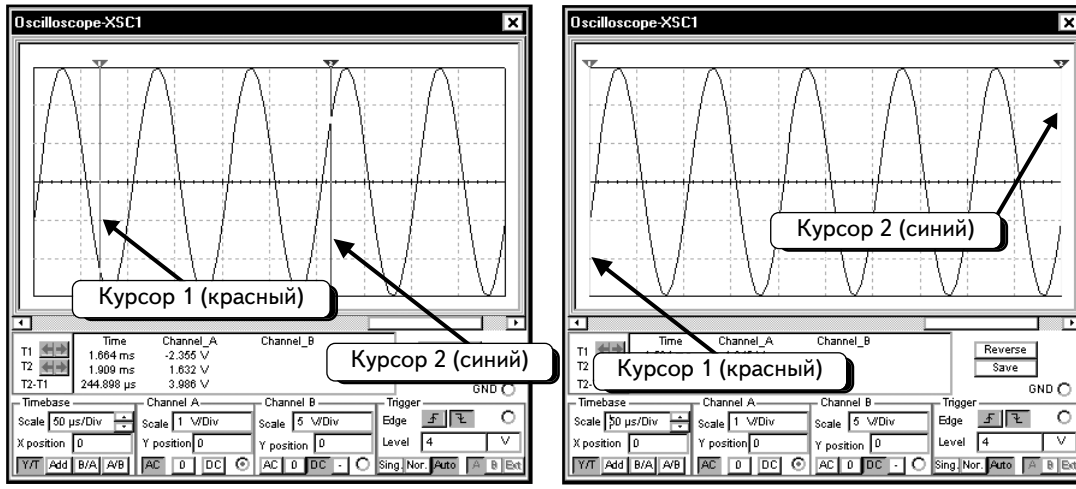
В последующих разделах к вопросу о синхронизации возвращаться не будем. Тем не менее, стоит отметить, что необходимо правильно выбирать уровень запуска, чтобы осциллограммы правильно отображались на экране.

6.1.4. Использование курсоров

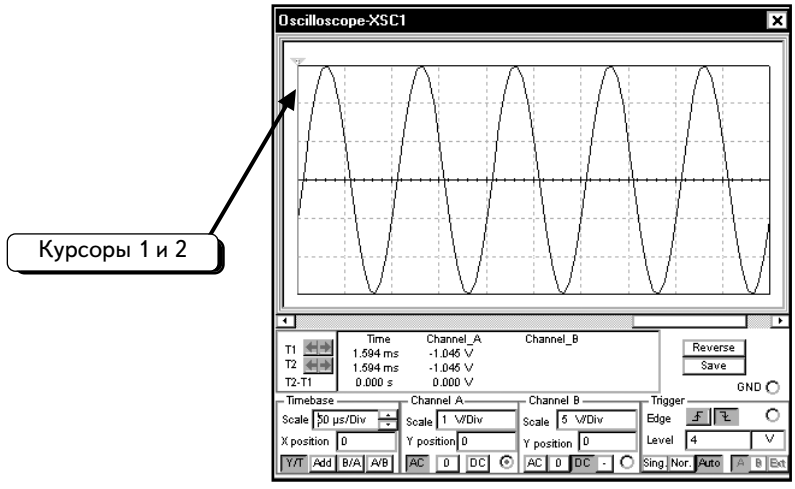
Осциллограф имеет два курсора, которые позволяют измерять мгновенные значения сигналов по осциллограммам на экране. Рассмотрим применение курсоров на примере схемы, показанной ниже:



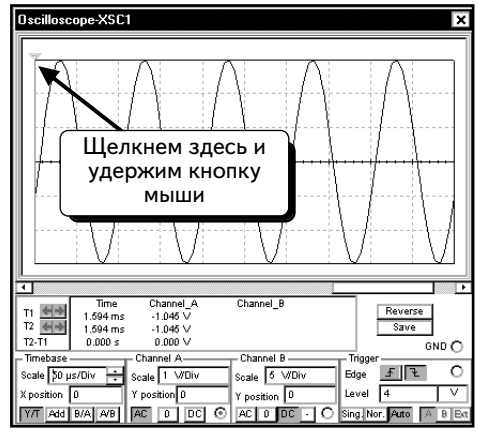
Проведем моделирование и изменим значение параметра **Timebase**, сделав его равным **50 µs/Div** (мс/дел.):



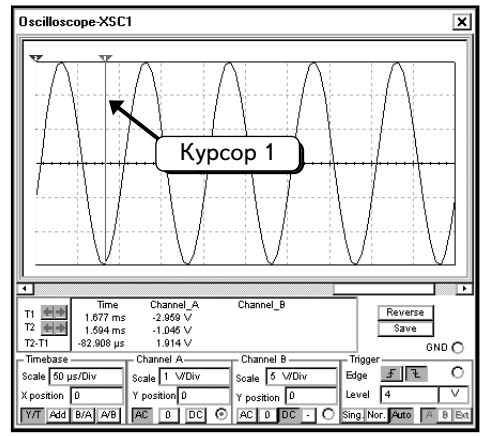
На экране видны два курсора: красный (курсор 1) и синий (курсор 2). На экране курсоры могут быть не так хорошо видны или располагаться в левой части экрана:



Так как курсоры находятся в одном месте, они выделены зеленым цветом. Можно разделить курсоры. Щелкнем по символу в виде зеленого треугольника и будем удерживать кнопку мыши нажатой:

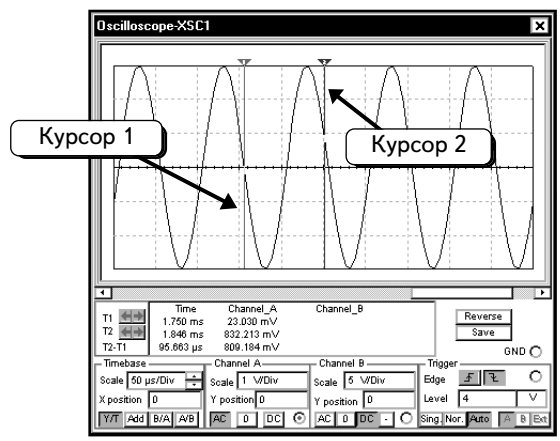


Удерживая кнопку мыши нажатой, переместим курсор. Будет перемещен курсор 1. Когда будет отпущена кнопка мыши, курсор 1 переместится :

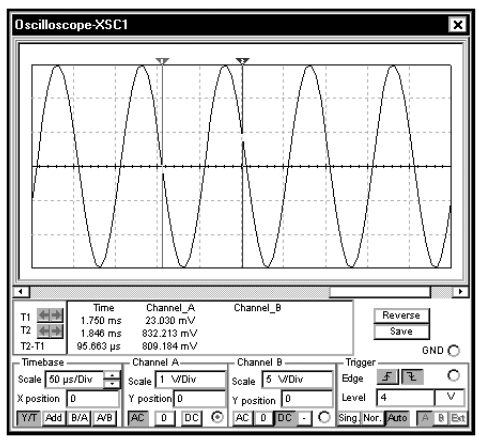


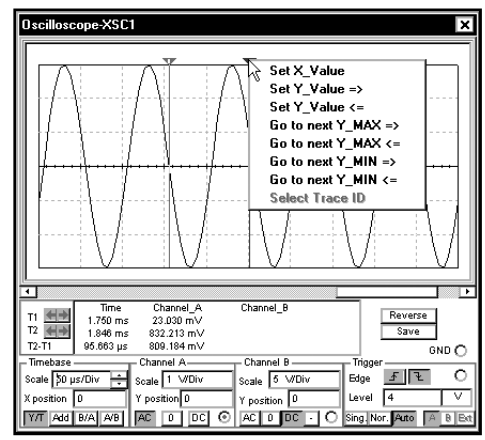
Курсоры будут разделены.

Теперь можно перемещать каждый курсор по отдельности. Чтобы переместить курсор 1, щелкнем по красному треугольнику, чтобы курсор 2 — по синему треугольнику. Сначала измерим период данного колебания. Поместим курсор 1 (красный) максимально близко к нулевой точке. Затем рядом поместим курсор 2. Примерное размещение курсоров показано ниже:

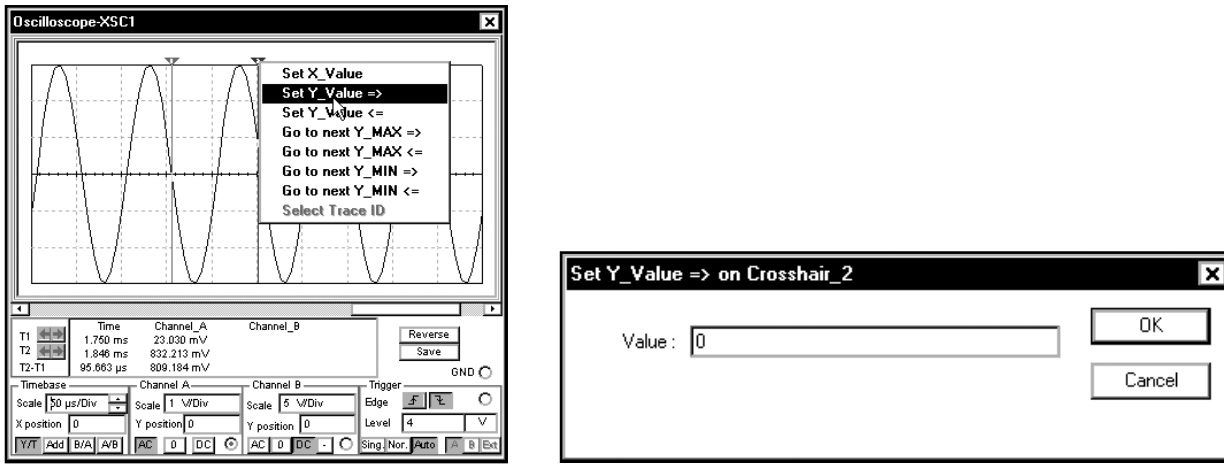


Курсор 1 находится очень близко от нулевой точки. Программа Multisim предлагает ряд инструментов, которые позволяют попасть именно в нулевую точку. Щелкнем правой кнопкой мыши по синему треугольнику курсора 2. Откроется контекстное меню:

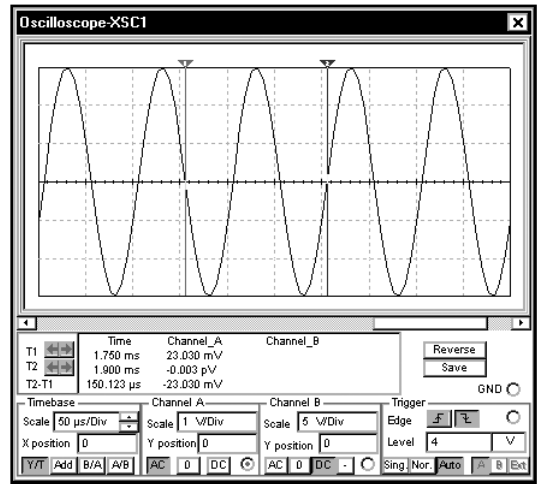




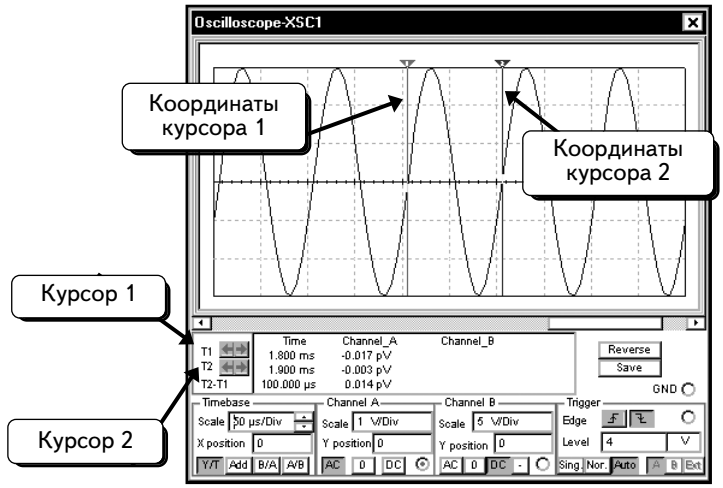
Выберем опцию **Set Y_Value =>**, чтобы указать значение для поиска. Курсор будет расположен справа от найденного значения. Выберем значение 0:



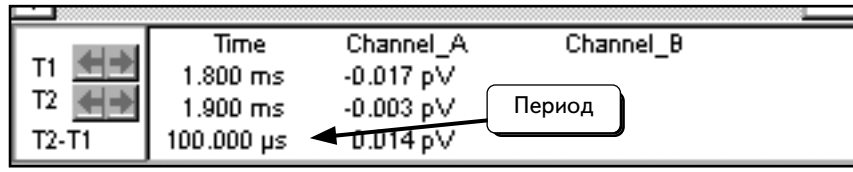
Когда будет нажата кнопка **OK**, курсор переместится в нулевую точку :



Курсор был помещен не в ту нулевую точку. Воспользуемся этой методикой, чтобы поместить курсор 1 (красный) в следующую нулевую точку:

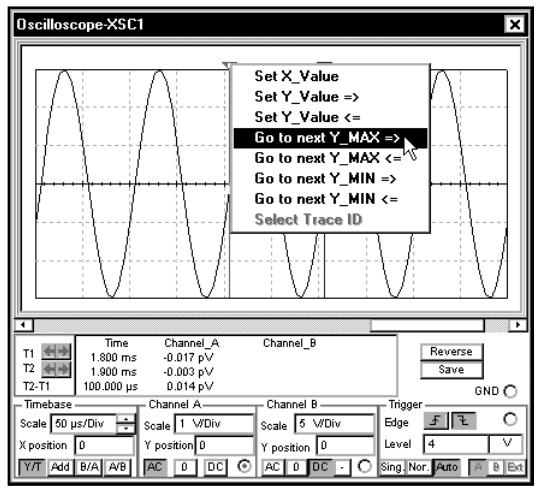


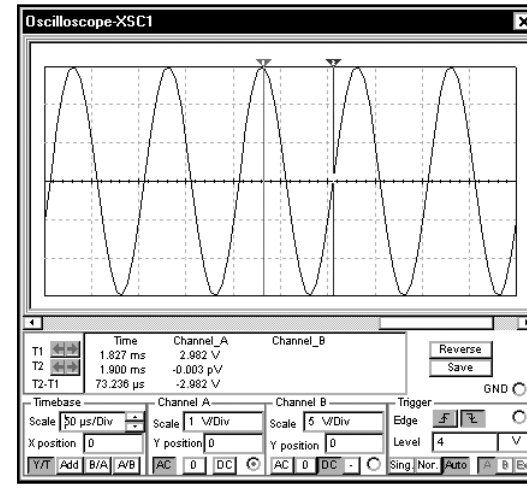
Информация о курсоре отобразится в текстовом окне под экраном осциллографа. Видны координаты всех кривых для каждого курсора:



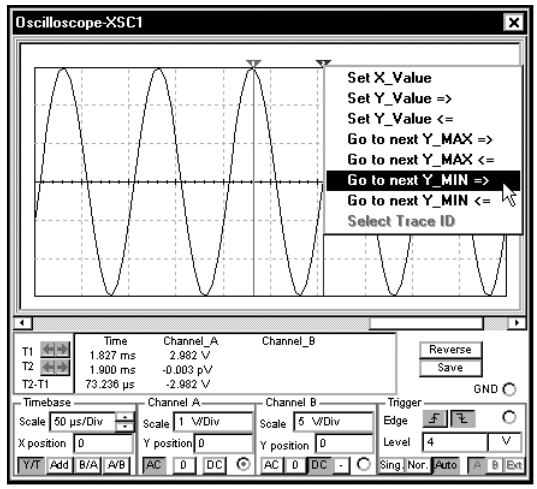
T1 и **T2**— это координаты курсоров 1 и 2 соответственно. В столбце **Time (Время)** приведены координаты каждого курсора по времени. В столбцах **Channel_A** и **Channel_B** указаны значения напряжения каналов **A** и **B** соответственно для позиции каждого курсора. Так как у канала **B** нет осциллограммы, этот столбец пуст. В поле **T2–T1** показана разность между значениями для курсоров 2 и 1. Видно, что разность моментов времени составляет 100 мкс. Это и есть период колебания, соответствующий частоте 10 кГц.

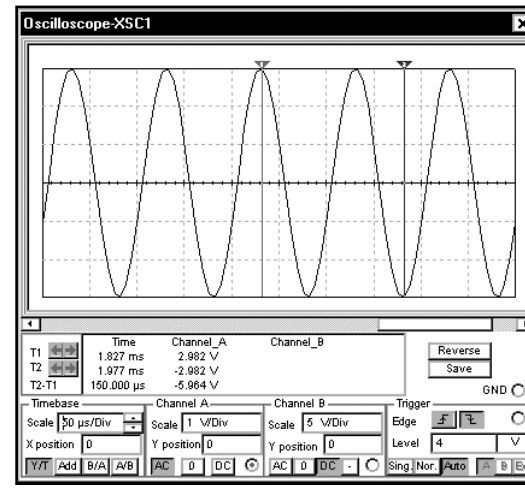
Далее следует измерить максимальный размах осциллограммы. Для этого можно переместить курсоры в определенное место или щелкнуть по курсору ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выбрать команду в контекстном меню. После щелчка по курсору ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и была выбрана команда **Go to next Y_MAX =>**, чтобы автоматически поместить курсор 1 (красный) в точку ближайшего максимума осциллограммы:



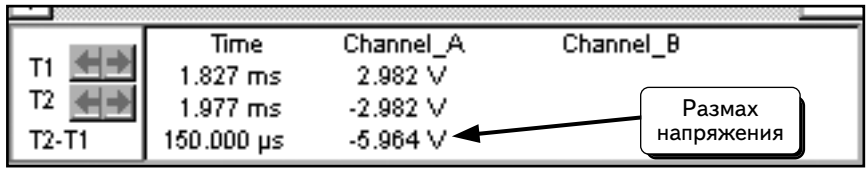


Для курсора 2 выбрана команда **Go to next Y_MIN =>**, чтобы автоматически поместить курсор 2 (синий) в точку ближайшего минимума осциллограммы:





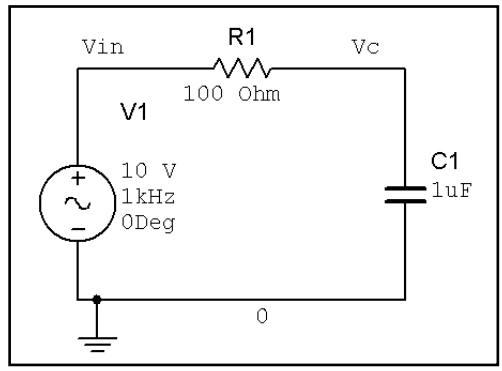
Увеличенное текстовое окно для курсора показано ниже:



Из показаний видно, что разность между напряжениями на курсорах 2 и 1 составляет **5,964** В. Это и есть максимальный размах напряжения осциллограммы. Он в два раза больше амплитуды. Следовательно, полученный результат соответствует амплитуде, которая указана на схеме (3 В).

6.2. Измерение фазы в емкостной схеме

В качестве примера измерим амплитуду и фазу напряжения на конденсаторе в следующей схеме:



Перед тем как воспользоваться осциллографом, выполним ряд расчетов. Комплексное сопротивление конденсатора при частоте 1000 Гц равно:

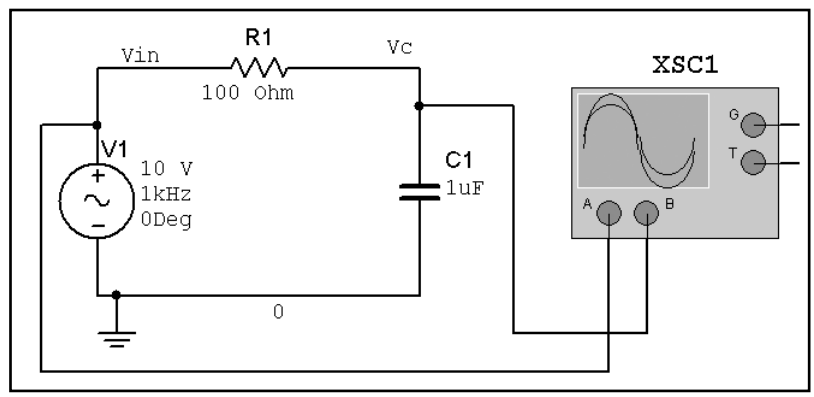
$$Z_C = 1/j\omega C = 1/(j2\pi(1000\ \text{Гц})(10^{-6}\Phi)) = -j159{,}155\ \text{Ом} = 159{,}155\angle -90^{\circ}.$$

Будем использовать входное напряжение в качестве опорного. Его начальная фаза равна нулю, а комплексное значение можно записать в виде $V_{IN} = 10\angle 0^{\circ}$ В. Используя формулу для делителя напряжения, можно рассчитать напряжение на конденсаторе:

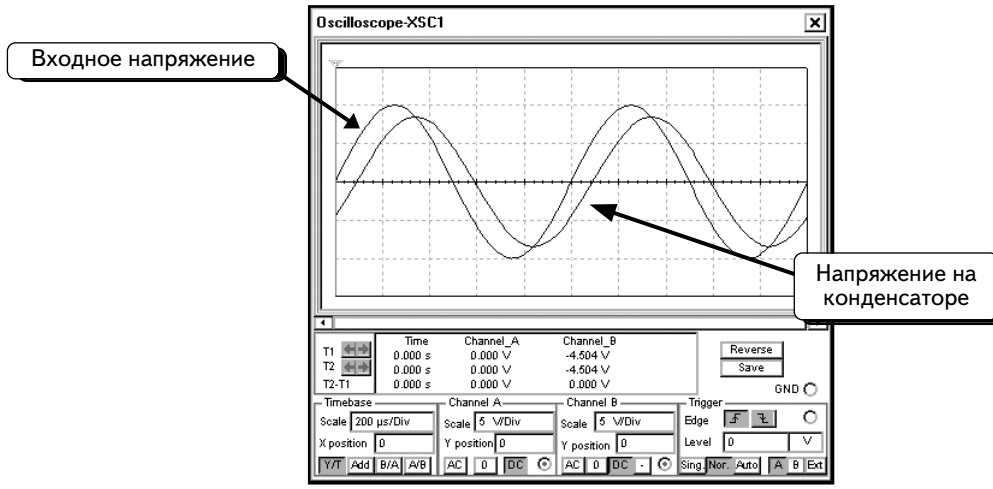
$$V_C = V_{IN}[Z_C/(Z_C + R)] = (10\angle 0^{\circ}\ \text{В})[-j159{,}155\ \text{Ом}/(-j159{,}155\ \text{Ом} + 100\ \text{Ом})] = (7{,}17 - j4{,}505)\ \text{В} = 8{,}467\angle -32{,}142^{\circ}\ \text{В}.$$

Из этих вычислений видно, что напряжение на конденсаторе составляет около 8,5 В, отставая от входного напряжения на 32°.

Сначала измерим амплитуду напряжения на конденсаторе. Подключим осциллограф, как показано ниже:

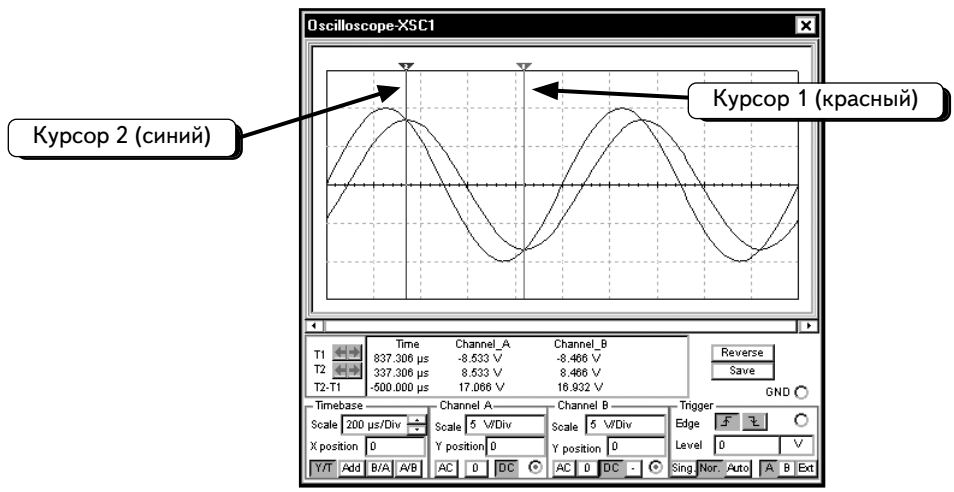


Подадим входное напряжение на канал **A**, а напряжение на конденсаторе — на канал **B**. Нажмем кнопку **Run/stop simulation**, чтобы начать моделирование. Дважды щелкнем по изображению осциллографа, чтобы открыть его окно:

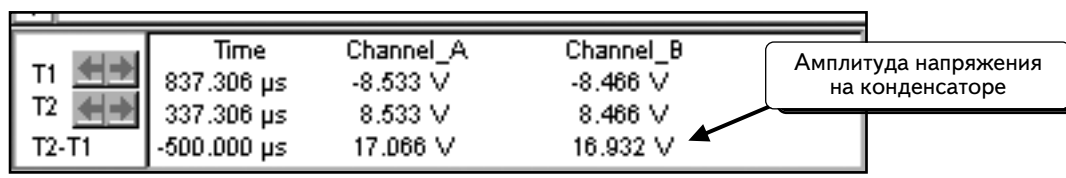


Различить кривые на экране может оказаться непросто. Из расчетов известно, что амплитуда напряжения на конденсаторе меньше, чем амплитуда входного напряжения. Следовательно, можно идентифицировать кривые по амплитуде.

Воспользуемся курсорами и измерим амплитуду напряжения на конденсаторе. О том, как работать с курсорами осциллографа, рассказано в разделе 6.1.4. Поместим курсоры так, как показано ниже:

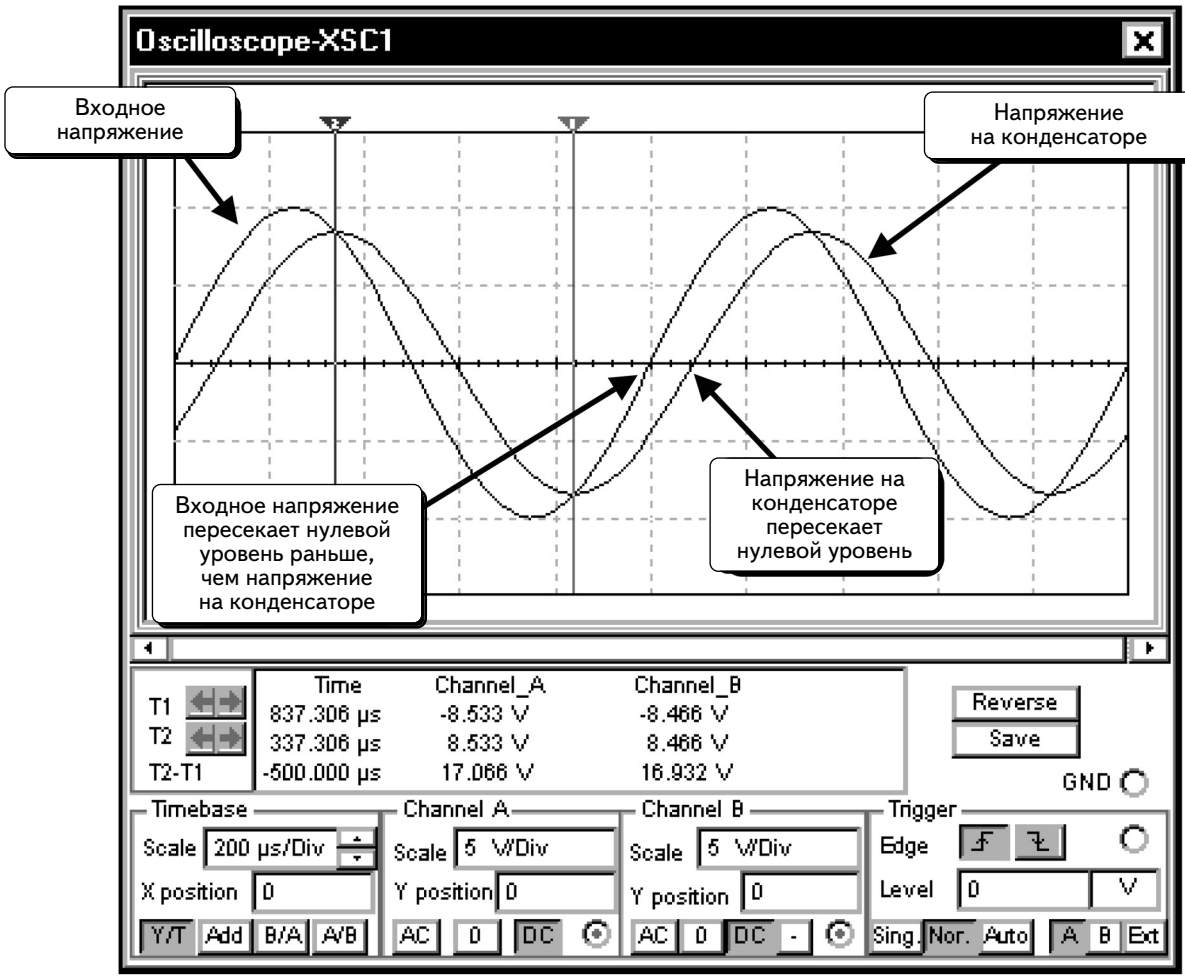


Курсоры размещены в точках максимума и минимума осциллограммы напряжения на конденсаторе. Данные для курсоров показаны ниже:



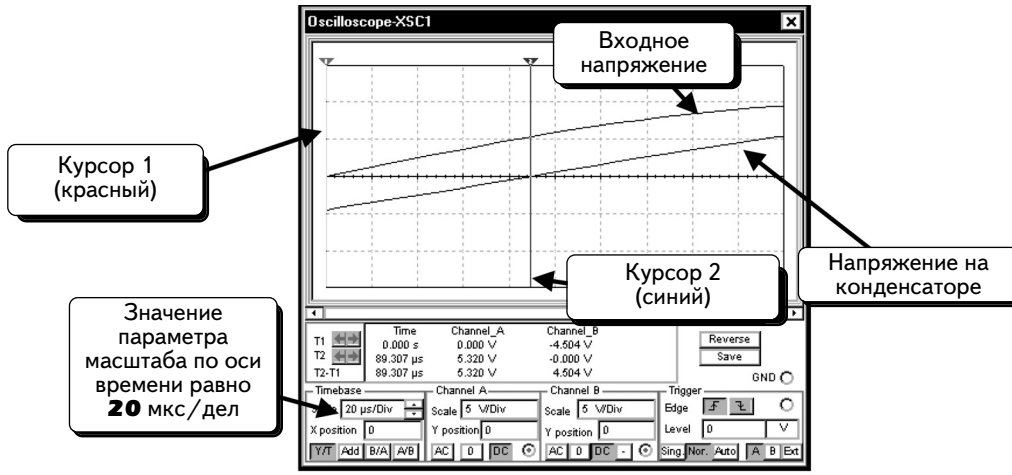
Мы измеряем напряжение конденсатора с помощью канала **B**, следовательно, значение **T2–T1** соответствует размаху напряжения на конденсаторе, который составляет, как это видно, **16,932** В. Размах вдвое превышает амплитуду, следовательно, при размахе **16,932** В амплитуда составит 8,466 В, как и расчетное значение. Это значит, что расчет подтверждается результатами измерений.

Далее измерим фазу напряжения на конденсаторе относительно фазы входного напряжения. Сначала посмотрим на экран осциллографа и определим, которая из кривых является опережающей:

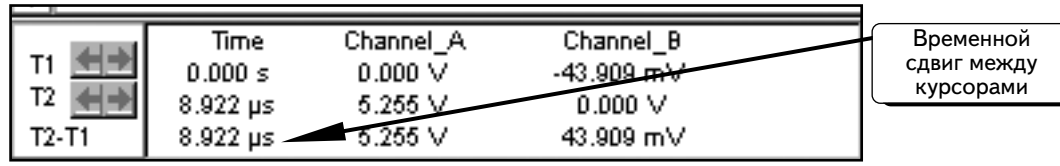


Мы идентифицируем напряжение на конденсаторе по меньшей амплитуде. Из осциллограмм видно, что входное напряжение опережает напряжение на конденсаторе (или что напряжение на конденсаторе отстает от входного напряжения). При расчете фазы напряжения на конденсаторе будем использовать отрицательное значение, так как напряжение на конденсаторе является отстающим по отношению к входному напряжению.

Чтобы измерить фазу, надо определить разность между моментами пересечения нуля двумя кривыми. Для того чтобы сделать это точнее, увеличим масштаб кривых по оси времени. Изменим значение параметра **Timebase** на **20 µs/Div** (**мкс/дел.**) и поместим курсоры в нулевые точки:



Разность моментов времени используется для расчета фазы. Данные для курсоров показаны на схеме:



Как видим, разность положения курсоров составляет Δt = **89,307 µs (мкс)**. Теперь необходимо преобразовать эту разность в разность фаз. Один период, или цикл, осциллограммы составляет 360°. Нам известен период сигнала, и можно использовать отношение:

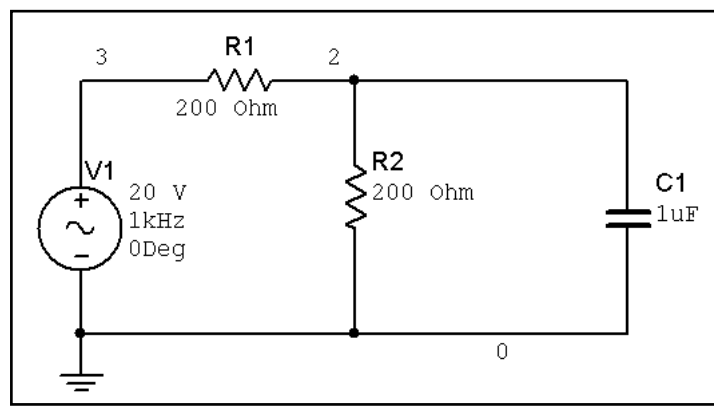
$$\Delta t/T = \theta/360^{\circ},$$

где T — это период, с; а θ — это фаза, град. Источник имеет частоту 1 кГц, следовательно, период осциллограммы составляет 1 мс. Решим уравнение:

$$\theta = 360^{\circ}(\Delta t/T) = 360^{\circ}(89{,}307 \text{ мкс}/1 \text{ мс}) = 32{,}15^{\circ}.$$

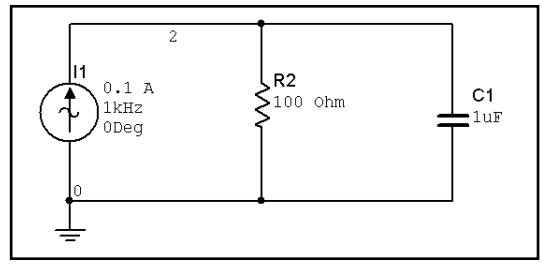
Ранее было показано, что напряжение на конденсаторе является отстающим по отношению к входному напряжению, следовательно, фаза будет иметь отрицательное значение. Таким образом, фаза составляет –32,15°. Расчетное значение равно –31,14°. Это значит, что результат измерений соответствует расчетному значению.

УПРАЖНЕНИЕ 6-1: Смоделируйте схему и определите амплитуду и фазу напряжения конденсатора:



РЕШЕНИЕ: Расчетное значение напряжения на конденсаторе равно: 8,467∠–32,142° В.

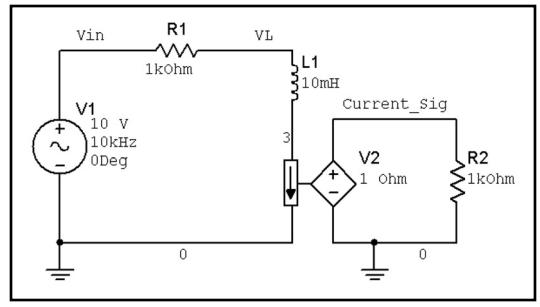
УПРАЖНЕНИЕ 6-2: Смоделируйте схему и определите амплитуду и фазу напряжения на конденсаторе:



РЕШЕНИЕ: Расчетное значение напряжения на конденсаторе равно: $8{,}467\angle -32{,}142^{\circ}$ В.

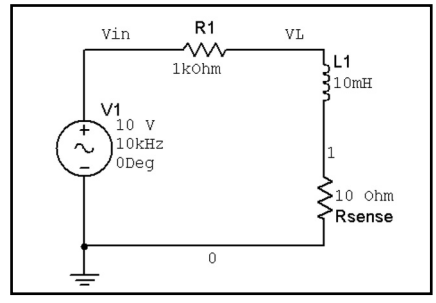
6.3. Измерение фазы в индуктивной схеме

Проведем измерения амплитуды и фазы в индуктивной схеме. С точки зрения моделирования вычисление амплитуды и фазы индуктивной схемы выполняется так же, как описано в предыдущем разделе. Чтобы показать различие, мы отобразим ток, а не напряжение на катушке индуктивности. Для этого необходимо включить в схему датчик тока и создать сигнал напряжения, соответствующий значению тока. Руководство по программе Multisim рекомендует использовать для этой цели источник напряжения, управляемый током с коэффициентом передачи в 1 Ом. При этом устройство будет реагировать на ток, а его выходное напряжение, измеряемое осциллографом, будет численно равно величине тока:



Компонент **V2** — это источник напряжения, управляемый током. Выходное напряжение V2 равно измеряемому току (в данном случае это ток катушки индуктивности). Коэффициент передачи источника равен 1 Ом. Он выражается в омах, так как выходное напряжение датчика равно коэффициенту передачи, умноженному на ток (измеренный в амперах). Чтобы выходное напряжение измерялось в вольтах, а ток — в амперах, необходимо коэффициент передачи выражать в омах. В схему добавлен резистор **R2**, чтобы избежать ошибки, которая возникнет, если к узлу подключен только один компонент. Значение резистора R2 никак не влияет на схему, то есть является произвольным.

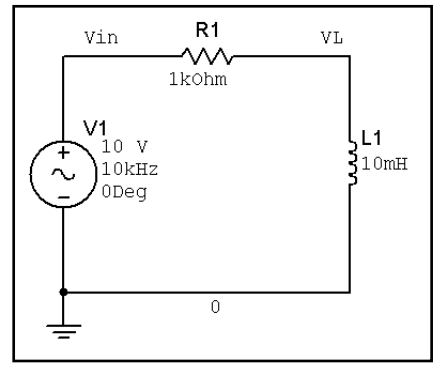
Сложность применения данного метода состоит в том, что у вас, скорее всего, нет реального датчика тока, следовательно, виртуальная модель не будет соответствовать настоящей модели схемы. Большинство таких датчиков тока на рынке стоит достаточно дорого. Мы будем использовать очень дешевый датчик, который называется резистивным датчиком тока (current-sensing resistor):



В схему добавлен резистор датчика (**Rsense**). Напряжение данного датчика невелико, поэтому он не сможет существенно повлиять на работу схемы. Ток, проходящий через датчик **Rsense**, соответствует значению, которое мы будем измерять. Чтобы определить ток, измерим напряжение на резисторе, а затем разделим его на сопротивление.

Сопротивление датчика тока зависит от двух факторов. Во-первых, оно должно быть достаточно мало по сравнению с сопротивлением схемы и не влиять на расчетное значение силы тока. Во-вторых, оно не должно быть настолько мало, чтобы сложно было бы измерить напряжение на нем с помощью имеющихся инструментов. Таким образом, сопротивление датчика тока определяется его воздействием на схему, а также значением измеряемого тока. В данном примере значение **Rsense** равно 10 Ом, а значение R1 — 1 кОм. Следовательно, наличие датчика тока приводит к погрешности в измерениях, которая составляет 1 %. Сила тока составляет около 10 мА, а напряжение на датчике **Rsense** — около 100 мВ. Такое напряжение несложно измерить с помощью осциллографа.

Рассчитаем амплитуду и фазу тока через катушку индуктивности. Не будем учитывать сопротивление датчика, так как нас интересует значение параметров для исходной схемы. Датчик **Rsense** был введен только для измерения силы тока. Рассчитаем значение тока:



Сопротивление катушки при частоте 10 кГц равно:

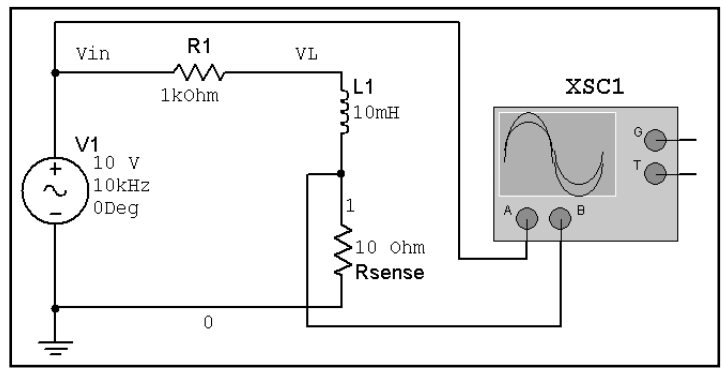
$$Z_L = j\omega L = j2\pi(10000\ \text{Гц})(0{,}01\text{Гн}) = j628{,}319\ \text{Ом} = 159{,}155\angle 90^\circ.$$

В расчетах использовано входное напряжение, фаза которого равна 0 . Это значит, что $V_{IN} = 10\angle 0^\circ$ В. Схема последовательная, поэтому

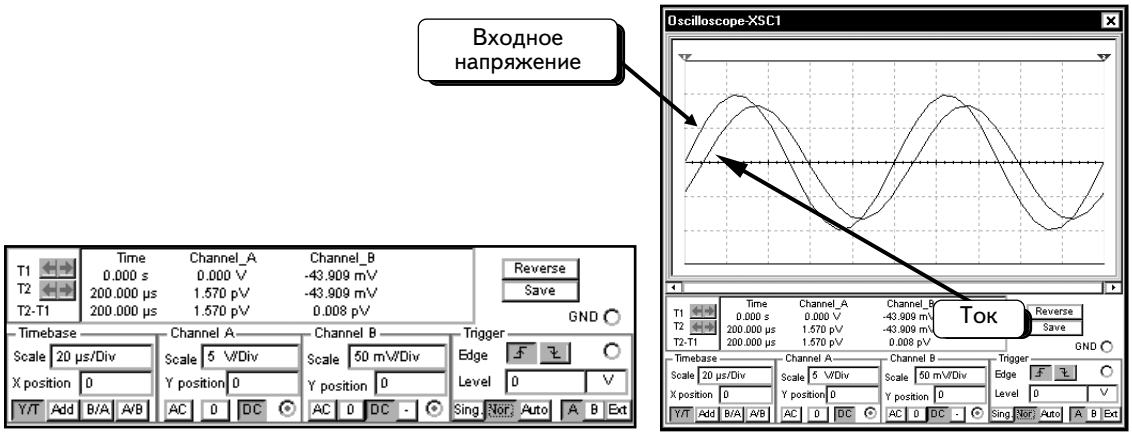
$$I_L = V_{IN}/(Z_L + R) = 10\angle 0^\circ\ \text{В}/(1000\ \text{Ом} + j628{,}319\ \text{Ом}) = (7{,}17 - j4{,}505)\text{мА} = 8{,}467\angle -32{,}142^\circ\ \text{мА}.$$

Как видно из расчетов, амплитуда тока составляет около 8,5 мА, а фаза тока отстает от входного напряжения приблизительно на 32°.

Сначала измерим амплитуду тока. Подключим, как показано, осциллограф и датчик тока:

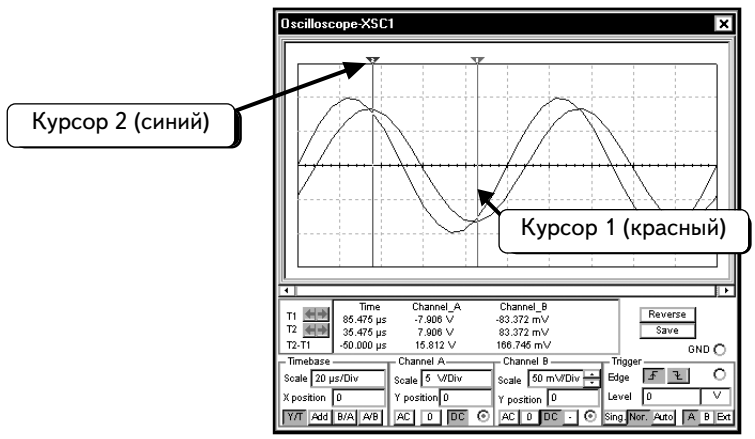


Входное напряжение подано на канал **A**, а напряжение с датчика тока — на канал **B**. Нажмем кнопку ***Run/stop simulation*** , чтобы начать моделирование. Дважды щелкнем по осциллографу, чтобы открыть окно:

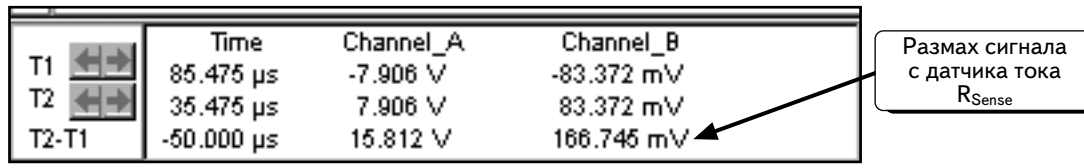


Две кривые удобно сравнивать при изменении масштаба напряжения для канала **B**. Напряжение на датчике тока очень невелико. При изменении масштаба видно, что кривая тоже изменится.

Теперь измерим амплитуду тока с помощью курсоров. Как работать с курсорами можно посмотреть в разделе 6.1.4. Поместим курсоры так, как показано ниже:



Курсоры размещены в максимуме и минимуме осциллограммы тока. Координаты, соответствующие положениям курсоров, показаны ниже:

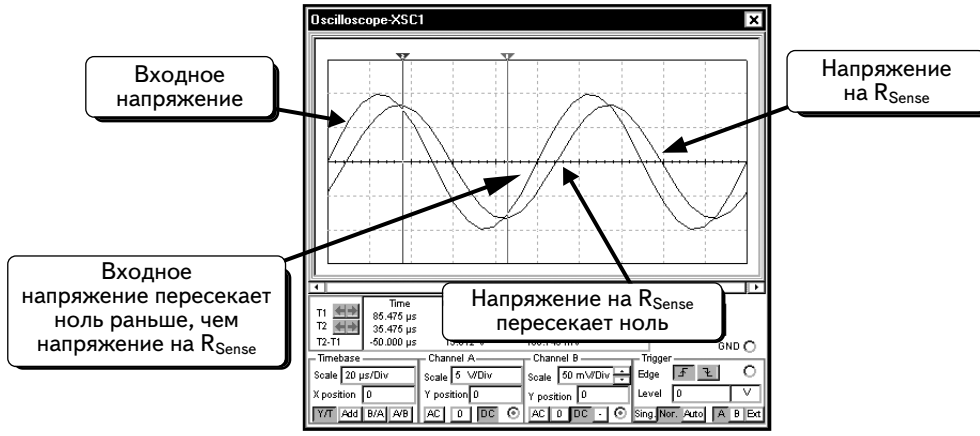


С помощью канала **B** измеряем напряжение датчика тока, следовательно, значение VB соответствует току. Размах тока в два раза превышает амплитуду, следовательно, при размахе напряжения в ***166,745 mV*** **(мВ)** амплитуда составит ***83,37 mV*** **(мВ)**. Чтобы определить ток I, нужно разделить напряжение датчика тока на его сопротивление:

$$I = V_{RSense}/R_{Sense} = 83{,}37 \text{ мВ}/10 \text{ Ом} = 8{,}337 \text{ мА}.$$

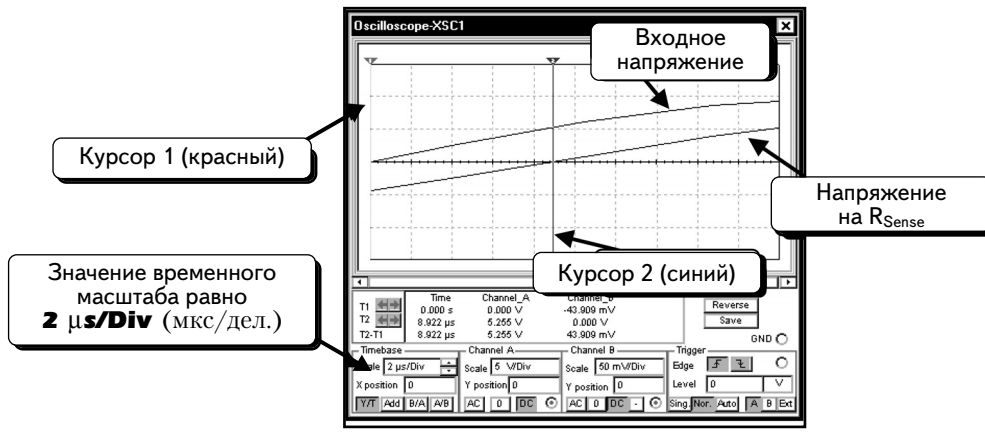
Расчетное значение амплитуды тока равнялось 8,467 мА. Результат измерения (8,337 мА) отличается от расчетного значения на 1,5 %. Ошибка появилась вследствие того, что было проигнорировано сопротивление датчика тока в наших расчетах, а также потому, что измерялся достаточно слабый сигнал. Помните о том, что при добавлении в схему датчика тока в расчетах появляется ошибка, составляющая 1 %.

Далее измерим фазу тока относительно фазы входного напряжения. Сначала посмотрим на экран осциллографа и определим, какая кривая является опережающей:

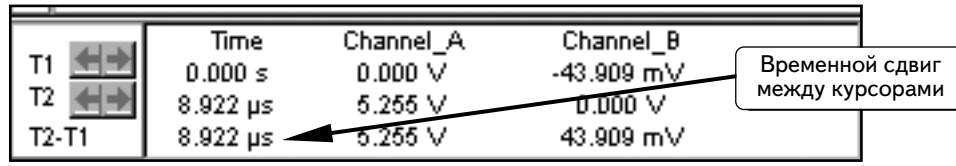


Как следует из рисунка, входное напряжение опережает ток (или, что то же самое, ток отстает от входного напряжения). При таком расположении кривых фазовый угол тока будет отрицательным. Чтобы измерить фазу, необходимо определить разность моментов пересечения кривыми нулевой линии (оси времени).

Для удобства измерений изменим масштаб по оси времени. Для этого введем значение параметра **Timebase**, равное **2 µs/Div** (мкс/дел.), и поместим курсоры в нулевые точки:



Для расчета фазы используется разность времени пересечения для двух кривых. Данные для курсоров показаны ниже:



Как видно, разность значений времени, показываемых курсорами, равна: Δt = **8,922** мкс. Преобразуем Δt в разность фаз. Один период, или цикл, осциллограммы составляет 360°. Зная период сигнала можно использовать отношение:

$$\Delta t/T = \theta/360^{\circ},$$

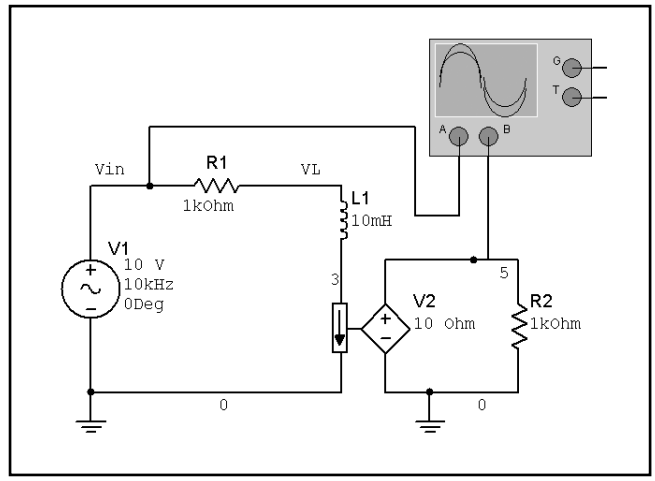
где T — период в с, а θ — фазовый угол, град. Источник имеет частоту 10 кГц, следовательно, период осциллограммы составляет 0,1 мс. Решим уравнение:

$$\theta = 360^{\circ}\Delta t/T = 360^{\circ}\cdot(8{,}922 \text{ мкс}/0{,}1 \text{ мс}) = 32{,}12^{\circ}.$$

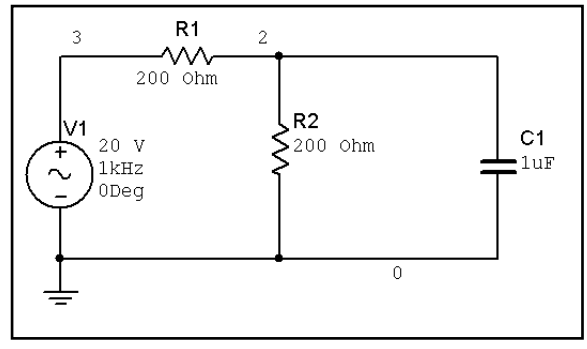
Ранее мы выяснили, что ток отстает от входного напряжения, из чего следует, что фаза будет иметь отрицательное значение. Таким образом, фаза составляет –32,12°. Расчетное значение равно –31,14°. Это значит, что результат измерений соответствует расчетному значению.

УПРАЖНЕНИЕ 6-3: Проведите моделирование для RL-цепи, описанной в данном разделе. Вместо датчика тока используйте источник напряжения, управляемый током, с коэффициентом передачи в 10 Ом. Покажите, что значения очень близки к расчетным значениям, полученным в этом разделе.

РЕШЕНИЕ: Проведите моделирование для схемы, показанной ниже:



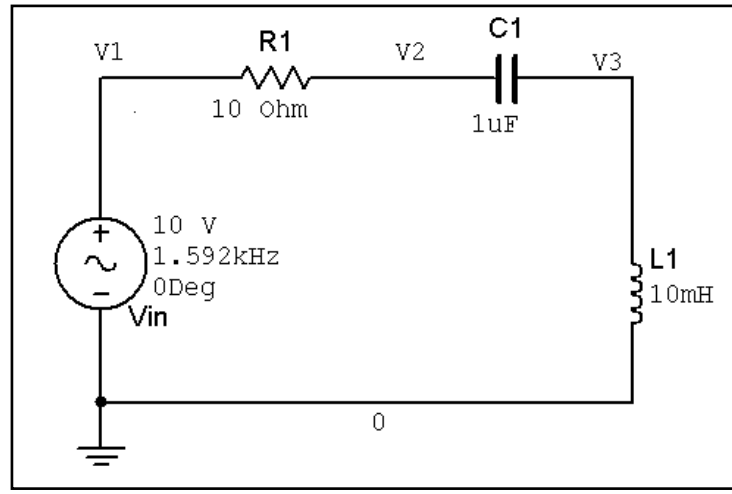
УПРАЖНЕНИЕ 6-4: Проведите моделирование для RC-цепи и определите амплитуду и фазу тока конденсатора:



РЕШЕНИЕ: Комплексное значение тока конденсатора равно: 0,0532∠–57,86° А.

6.4. Последовательная резонансная RLC-цепь

В качестве последнего примера измерения амплитуды и фазы рассмотрим последовательную RLC-цепь при резонансной частоте:



Обратите внимание: узлы помечены как **V1**, **V2** и **V3**. Это упрощает их описание. Если нет желания переименовывать узлы, можно этого не делать. В данном примере нас интересует входное напряжение и напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке индуктивности. Все осциллографы измеряют напряжение относительно земли. Таким образом, можно использовать осциллограф для измерения напряжение узлов **V1**, **V2** и **V3**. В данной схеме входное напряжение и напряжение на катушке определить легко, так как первое равно V1, а второе — V3. Измерить напряжения на резисторе и конденсаторе несколько сложнее. Напряжение на резисторе равно V1–V2, а на конденсаторе — V2–V3. Большинство осциллографов поддерживают функцию вычитания, то есть можно найти разность значений для каналов **A** и **B**). Такие осциллографы могут отобразить напряжение на резисторе или конденсаторе. Однако на некоторых осциллографах при получении разности напряжений двух входов (например по каналам **A** и **B**) нельзя одновременно получить на экране напряжение по одному из входов. Это значит, что нет возможности сравнить напряжение на резисторе и входное напряжение. Такое ограничение зависит от того, с каким осциллографом вы работаете. С современным четырехканальным осциллографом можно без проблем отобразить все необходимые осциллограммы.

При получении осциллограммы, которая показывает разность сигналов для каналов **A** и **B**, осциллограф Multisim не может отображать другие кривые. Чтобы показать напряжения на резисторе и конденсаторе по отношению к другому напряжению в схеме, будем использовать измерения относительно земли. Об этом поговорим позднее.

Перед тем как проводить измерения с помощью осциллографа, выполним ряд расчетов. Прежде всего необходимо определить резонансную частоту ω_o:

$$\omega_o = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 1/[2\pi\sqrt{(0{,}01\text{Гн})(1\times10^{-6}\Phi)}] = 1592\ \text{Гц}.$$

Теперь можно рассчитать сопротивление конденсатора и катушки при резонансной частоте:

$$Z_C = 1/j\omega C = 1/j2\pi(1592\ \text{Гц})(1\times10^{-6}\Phi) = -j100\ \text{Ом} = 100\angle-90^\circ:$$
$$Z_L = j\omega L = j2\pi(1592\ \text{Гц})(0{,}01\text{Гн}) = j100\ \text{Ом} = 100\angle90^\circ.$$

При резонансной частоте сумма сопротивлений катушки и конденсатора равна 0.

Фаза входного напряжения равна 0, и его комплексное значение составляет $V_{IN} = 10\angle0^\circ$ В. С помощью функции деления рассчитаем напряжения всех элементов в схеме:

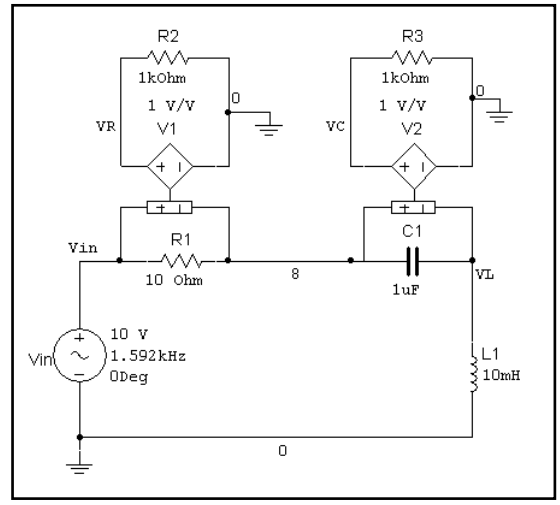
$$V_R = V_{IN}[R/(Z_C + Z_L + R)] = (10\angle 0^\circ \text{ В})\ [10 \text{ Ом}/(-j100 \text{ Ом} + j100 \text{ Ом} + 10 \text{ Ом})] = 10 \text{ В} = 10\angle 0^\circ \text{ В}:$$

$$V_C = V_{IN}[Z_C/(Z_C + Z_L + R)] = (10\angle 0^\circ \text{ В})\ [-j100 \text{ Ом}/(-j100 \text{ Ом} + j100 \text{ Ом} + 10 \text{ Ом})] = -j100 \text{ В} = 100\angle -90^\circ \text{ В}:$$

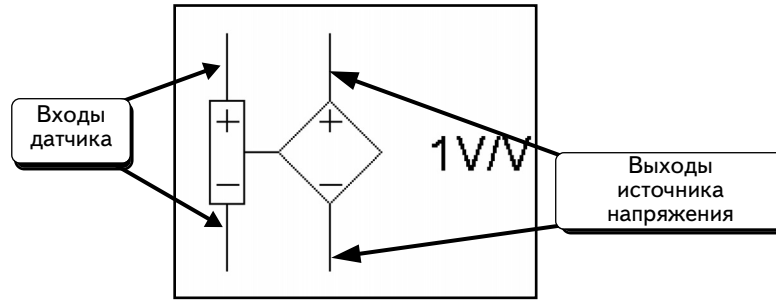
$$V_L = V_{IN}[Z_L/(Z_C + Z_L + R)] = (10\angle 0^\circ \text{ В})\ [j100 \text{ Ом}/(-j100 \text{ Ом} + j100 \text{ Ом} + 10 \text{ Ом})] = j100 \text{ В} = 100\angle 90^\circ \text{ В}.$$

Как видим, напряжение на резисторе равно входному напряжению (имеет ту же фазу и частоту). Напряжение на конденсаторе отстает на 90° от входного, а напряжение на катушке опережает входное на 90°. Амплитуды напряжения на катушке и на конденсаторе совпадают, а их фазы отличаются на 180°, следовательно, их сумма равна 0.

Изменим схему, чтобы упростить измерение напряжений на резисторе и конденсаторе. Для этого добавим в схему источники напряжения, управляемые напряжением с коэффициентом передачи равным 1:



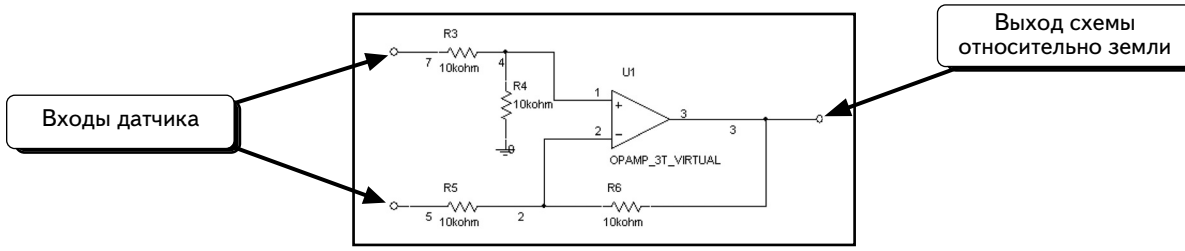
Увеличенное изображение источника напряжения, управляемого напряжением, показано ниже:



Выводы датчика напряжения можно подключить к любым двум узлам, тогда на выходе формируется напряжение, равное разности напряжений между этими узлами, умноженное на коэффициент передачи. Так как этот коэффициент был выбран равным 1, выходное напряжение источника равно измеряемому напряжению. В предыдущей схеме, зависимые источники измеряют напряжения на резисторе и конденсаторе. Отрицательные выводы источников заземлены. Это позволяет измерять напряжения источников с помощью осциллографа.

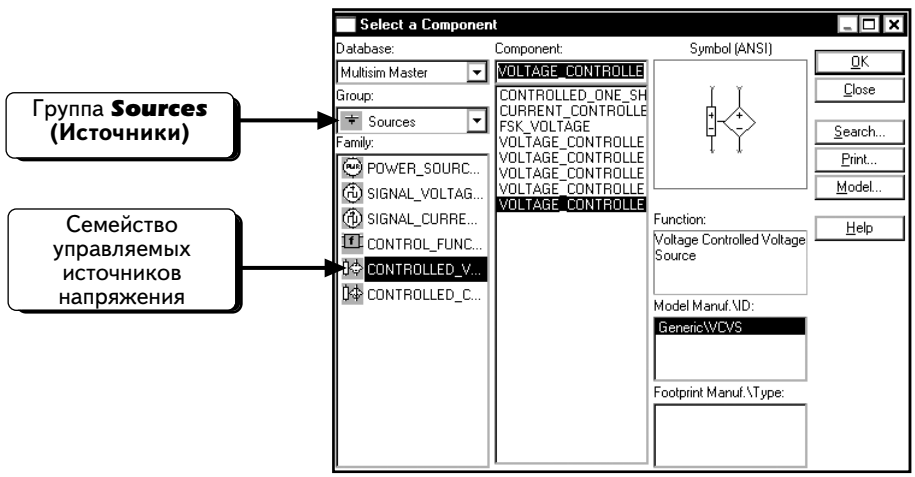
Пометим ключевые узлы в схеме как Vin, VR, VC и VL и будем измерять осциллографом напряжения именно на этих узлах.

Вы будете правы, решив, что данная методика является исключительно теоретической (потому что в лабораторных условиях невозможно применить источник напряжения, управляемый напряжением). Но можно создать схему на ОУ, которая выполняет такую же функцию. Обычно используют зависимый источник напряжения в качестве дифференциального усилителя (difference amplifier), то есть устройства, которое усиливает разность напряжений на своих входах. Один из способов подключения к схеме такого устройства показан ниже:

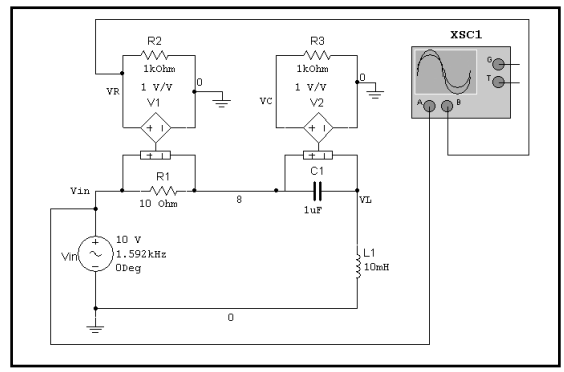


Вместо зависимого источника напряжения можно использовать схему на ОУ. При этом понадобится создать две схемы для измерения напряжения: одну на резисторе, другую — на конденсаторе. Данный метод не даст никаких преимуществ, а рисование схемы займет длительное время. Схема на ОУ может работать только в диапазоне входных напряжений от –15 до +15 В. Можно использовать такую схему в лабораторных условиях, но для снижения напряжения до приемлемого уровня придется добавить дополнительную схему.

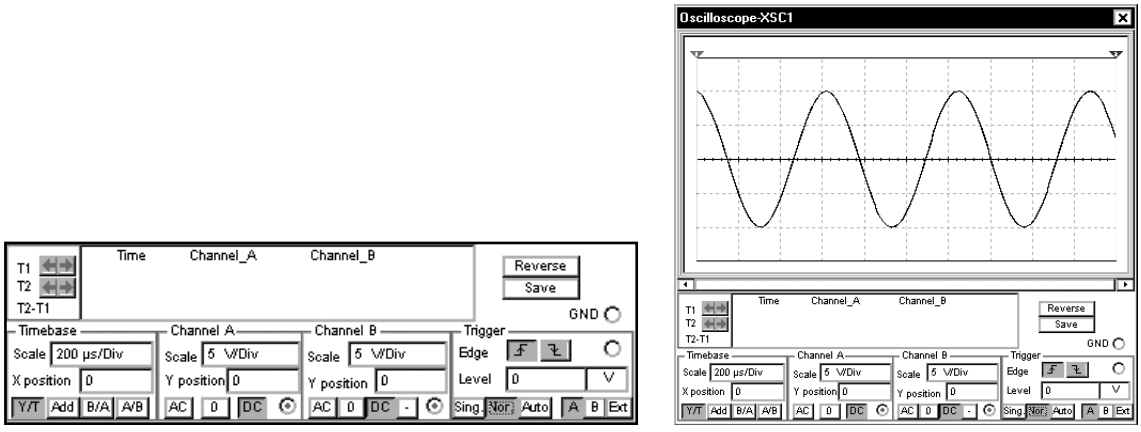
Зависимый источник напряжения находится в семействе **CONTROLLED_VOLTAGE_SOURCES** в группе **Sources**:



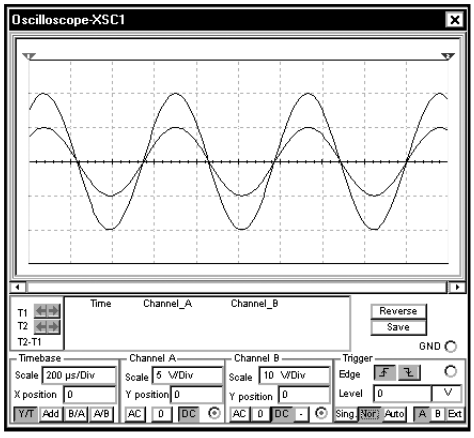
Сначала измерим входное напряжение и напряжение на резисторе. Подключим осциллограф, как показано ниже:



Входное напряжение подано на канал **A**, а напряжение на резисторе — на канал **B**. Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы выполнить моделирование. Дважды щелкнем по осциллографу, чтобы открыть его окно:

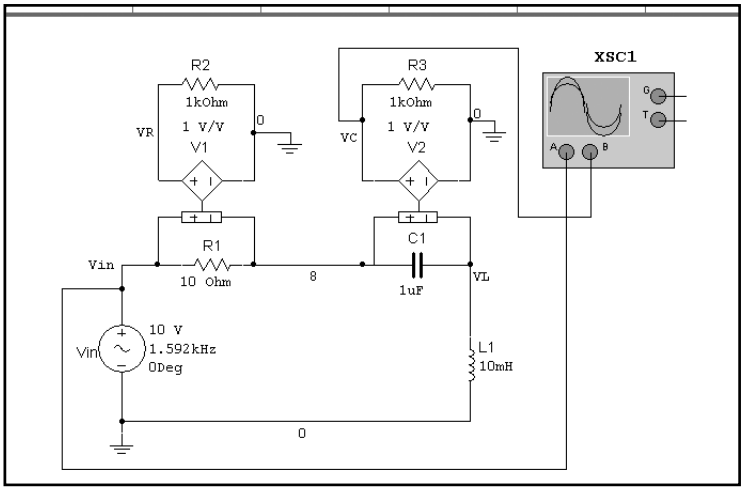


На экране осциллографа показаны две кривые (пока они сливаются). Если изменить масштаб для напряжения или **Y Position** для одного из каналов, то можно увидеть обе кривые. Изменим масштаб для канала **B**, установив его равным **10V/Div** (10 В/дел.):

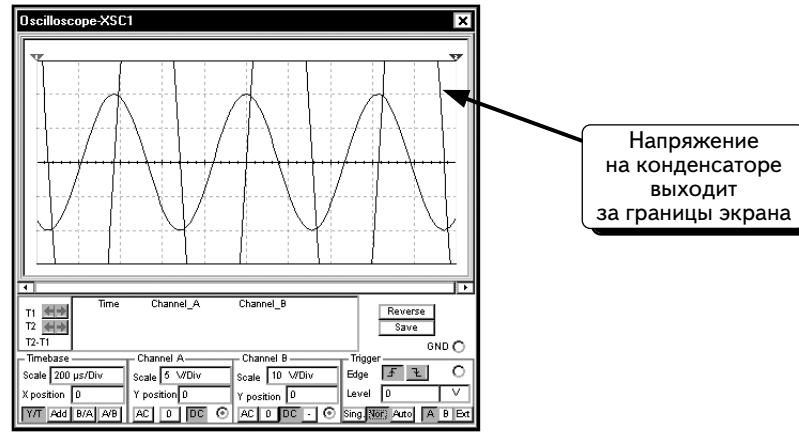


Теперь обе кривые видны на экране. Ранее настройки двух каналов совпадали, поэтому кривые выглядели одинаково. Данная модель показывает, что значение параметра **VIN** равно значению параметра **VR**. Это соответствует результатам наших вычислений.

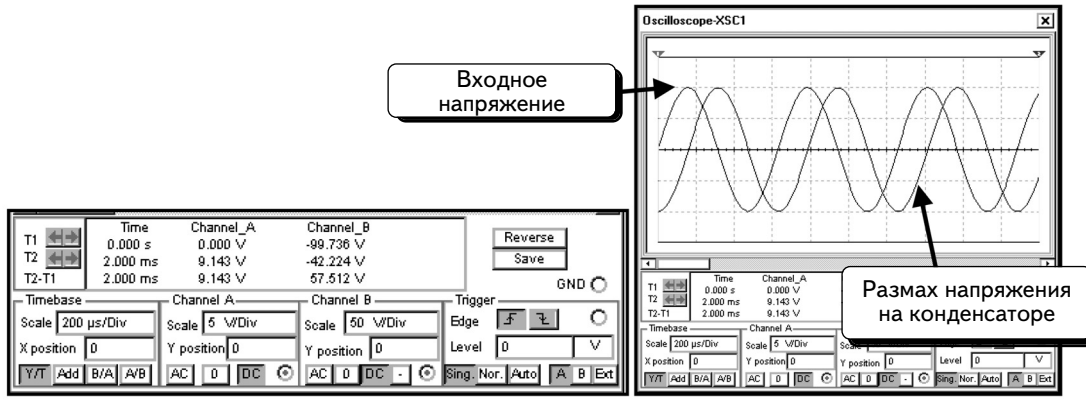
Далее определим амплитуду напряжения конденсатора и сравним ее с входным напряжением. Подключим канал **B** осциллографа к узлу **VC**:



Входное напряжение подано на канал **A**, а напряжение на резисторе — на канал **B**. Нажмем кнопку **Run/stop simulation**, чтобы выполнить моделирование. Дважды щелкнем по осциллографу, чтобы открыть его окно. Ниже показано, что настройка масштаба для канала **B** еще не изменена:

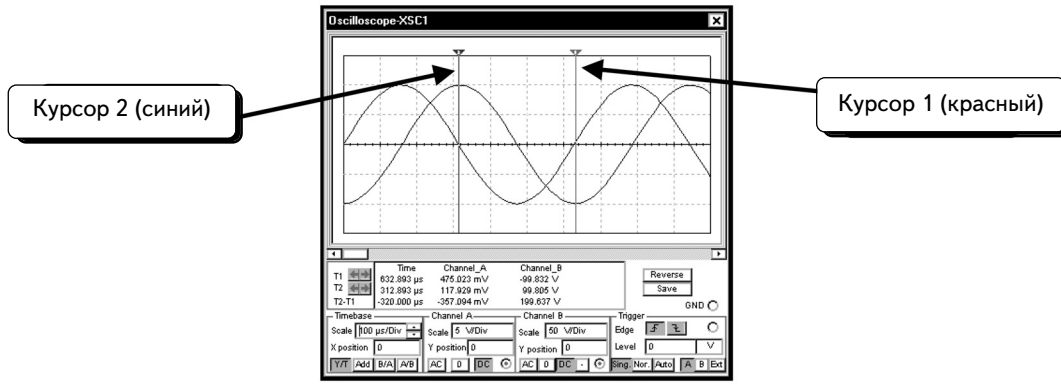


Напряжение на конденсаторе намного больше напряжения на резисторе в предыдущем примере. Напряжение настолько велико, что при использовании масштаба, равного **10V/Div (10 В/дел.)**, его отобразить невозможно. Изменим масштаб для канала **B**, установив его равным **50 V/Div (50В/дел.)**:

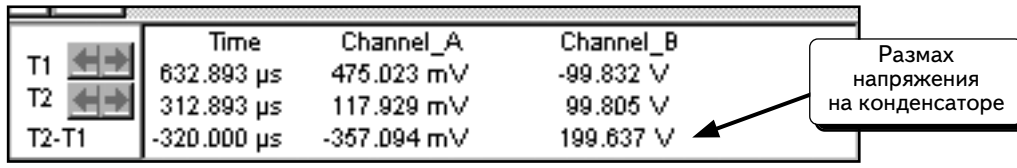


Взглянув на экран осциллографа, можно убедиться в том, что обе осциллограммы имеют близкие по величине амплитуды, но масштаб для канала **B** в десять раз больше, чем для канала **A**. Следовательно, напряжение на конденсаторе приблизительно в десять раз превышает входное напряжение.

Измерим теперь амплитуду напряжения на конденсаторе с помощью курсоров. (Как работать с курсорами осциллографа, можно посмотреть в разделе 6.1.4.) Установим курсоры так, как показано ниже:

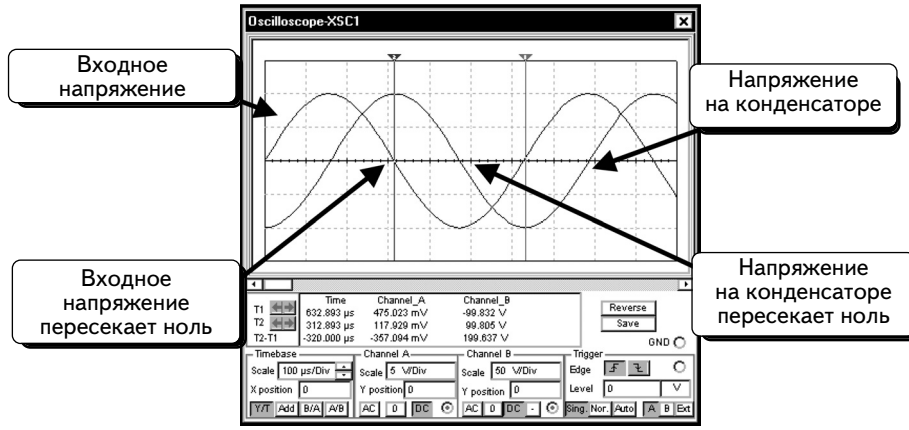


Курсоры размещены в точках максимума и минимума осциллограммы напряжения на конденсаторе. Данные курсоров показаны ниже:



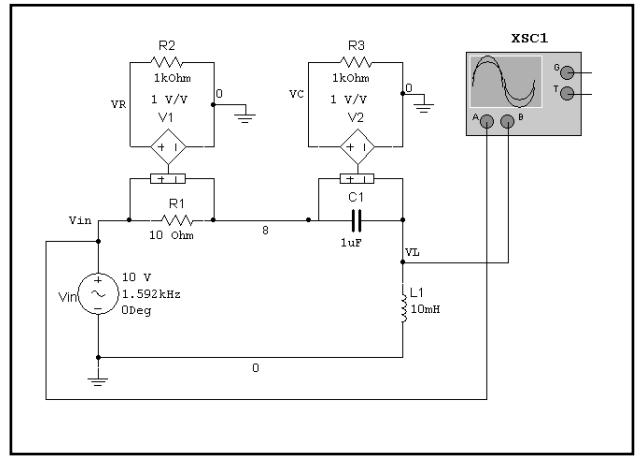
Напряжение на конденсаторе подано на канал **B**, значит, разность напряжений, показанная в графе **T2–T1** этого канала соответствует размаху напряжения на конденсаторе, равному **199,6** В. Размах вдвое превышает амплитуду, равную, соответственно, 99,8 В. Расчетное значение амплитуды напряжения на конденсаторе равнялось 100 В, и результаты измерений соответствуют расчетным значениям.

Далее измерим фазу напряжения конденсатора относительно фазы входного напряжения. На основании расчетов предположим, что напряжение конденсатора отстает по фазе от входного напряжения на 90°. Не будем использовать методики, описанные в разделах 6.2 и 6.3. Вместо этого вспомним, что когда одно колебание отстает по фазе от другого на 90°, то это значит, что одна кривая пересекает нулевую точку, а в этот момент другая кривая находится в точке максимума. Установив курсоры в нулевую точку, проверим наши предположения:

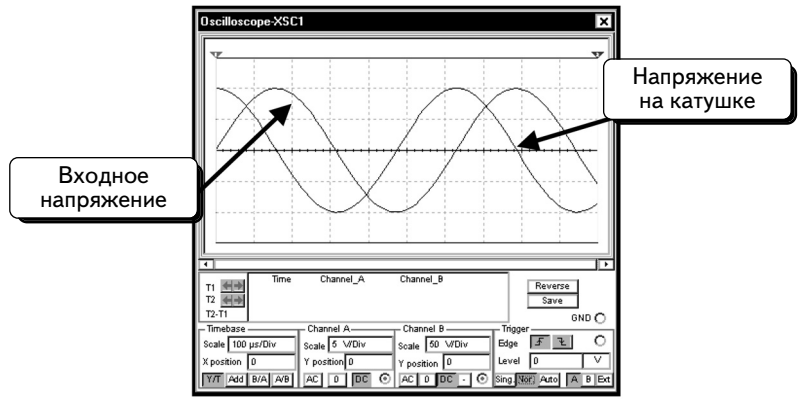


Видно, что нулевая точка одной осциллограммы совпадает с точкой максимума другой осциллограммы. Вывод: напряжение на конденсаторе отстает по фазе примерно на 90°.

Далее измерим амплитуду напряжения на катушке и сравним ее с амплитудой входного напряжения. Подключим канал **B** осциллографа к узлу **VL** и отобразим осциллограммы:

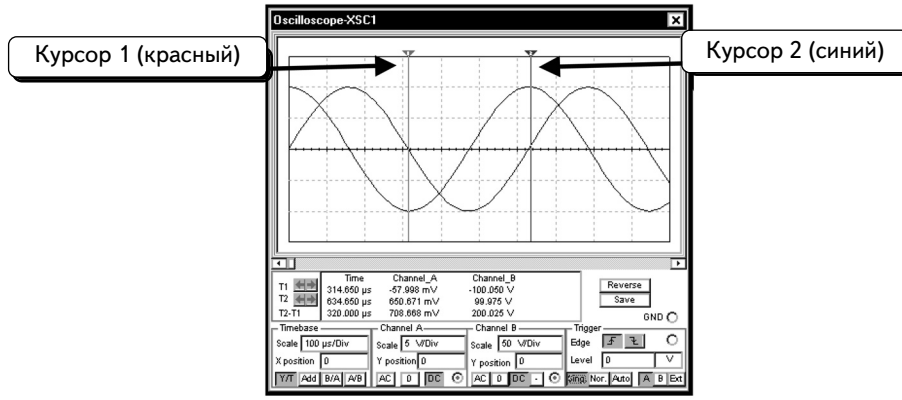


Входное напряжение измеряется с помощью канала **A**, а напряжение на катушке — с помощью канала **B**. Нажмем кнопку **Run/stop simulation**, чтобы выполнить моделирование. Дважды щелкнем по инструменту **Oscilloscope**, чтобы открыть окно осциллографа:

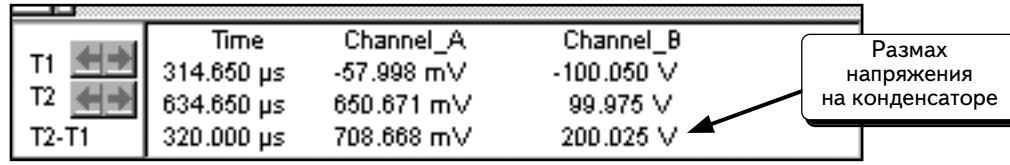


Настройки осциллографа совпадают с настройками, которые были использованы при последнем измерении напряжения на конденсаторе. Напряжение на катушке практически совпадает с напряжением на конденсаторе. Если идентифицировать кривые, то видно, что напряжение на катушке опережает входное напряжение (а в предыдущем примере напряжение на конденсаторе отставало от входного напряжения).

Далее воспользуемся курсорами и измерим амплитуду напряжения на катушке. (Как работать с курсорами осциллографа, можно ознакомиться в разделе 6.1.4.) Поместим курсоры так, как показано ниже:



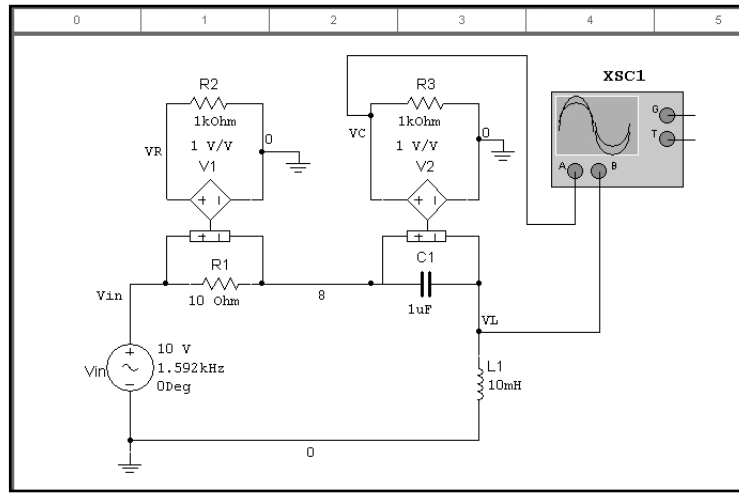
Курсоры размещены в точках максимума осциллограммы напряжения на катушке. Данные курсоров показаны ниже:



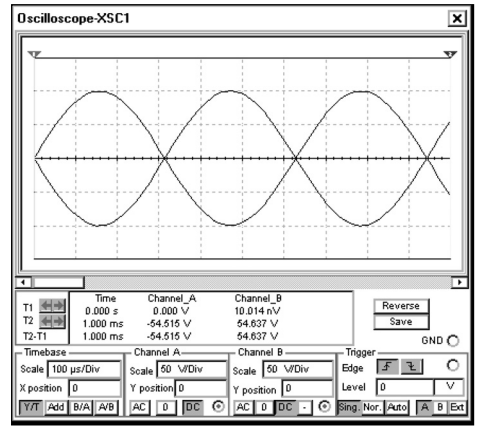
Напряжение на катушке измеряется с помощью канала **B**, значит, значение **T2–T1** соответствует максимальному напряжению на катушке. Размах напряжения равен **200,025** В и в два раза превышает амплитуду, следовательно, при таком размахе напряжения амплитуда составит около 100 В. Расчетное значение амплитуды напряжения на катушке равнялось 100 В. Следовательно, результаты измерений соответствуют расчетным значениям.

Теперь измерим фазу напряжения на катушке относительно фазы входного напряжения. Из расчетов видно, что напряжение на катушке опережает по фазе входное напряжение на 90°. Воспользовавшись методикой, с помощью которой определили фазу напряжения конденсатора, проверим фазовый сдвиг осциллограмм. На двух предыдущих осциллограммах видно, что нулевая точка одной осциллограммы соответствует точке максимума другой осциллограммы. Отсюда вывод: осциллограммы сдвинуты по фазе примерно на 90°.

Определим напряжения на катушке и на конденсаторе. Изменим схему так, как показано, ниже, что позволит измерить значение **VC** с помощью канала **A**:

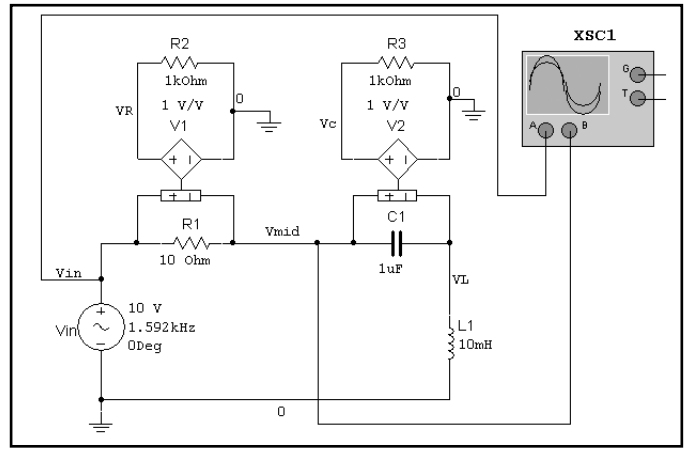


Выполним моделирование и изменим масштаб канала **A**, сделав его равным **50V/Div** (50 в/дел.):

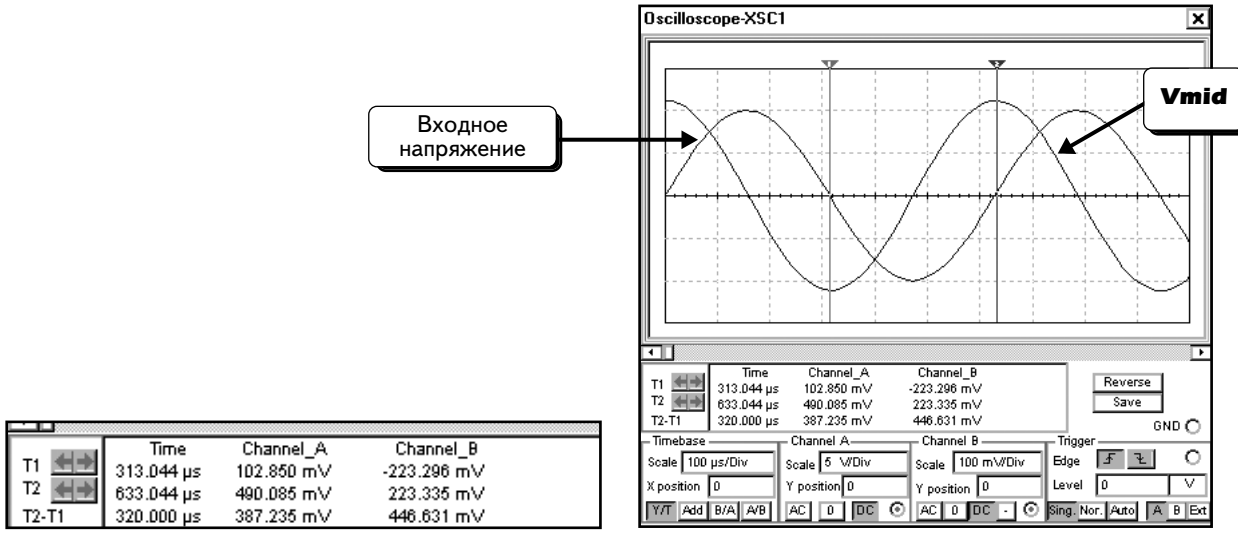


Видно, что амплитуды осциллограмм почти равны, а сами осциллограммы сдвинуты по фазе примерно на 180°. Это тот результат, который и ожидался.

В последнем примере измерим входное напряжение с помощью канала **A**, а напряжение на цепочке, состоящей из конденсатора и катушки, — с помощью канала **B**. Канал **B** подключен к узлу **Vmid**. Не нужно обозначать узел в схеме; достаточно подключить к нему канал **B**:

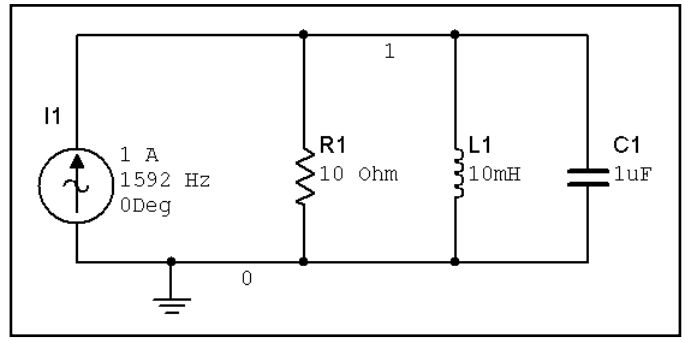


Во время моделирования можно заметить, что напряжение на канале **B** очень невелико. Изменим масштаб канала **B** на **100mV/Div (100 мВ/дел.)** Масштаб канала **A** составляет **5 V/Div (5 В/дел.)**:



Согласно расчету напряжение на цепочке, состоящей из конденсатора и катушки, должно равняться 0. В данном примере размах напряжения составляет 446,6 мВ. Это значение соответствует амплитуде 223 мВ. Напряжение не равно 0, так как частота источника сигнала не полностью соответствует резонансной частоте. Полученное значение достаточно мало, поэтому можно предположить, что схема работает правильно и наши расчеты напряжения верны.

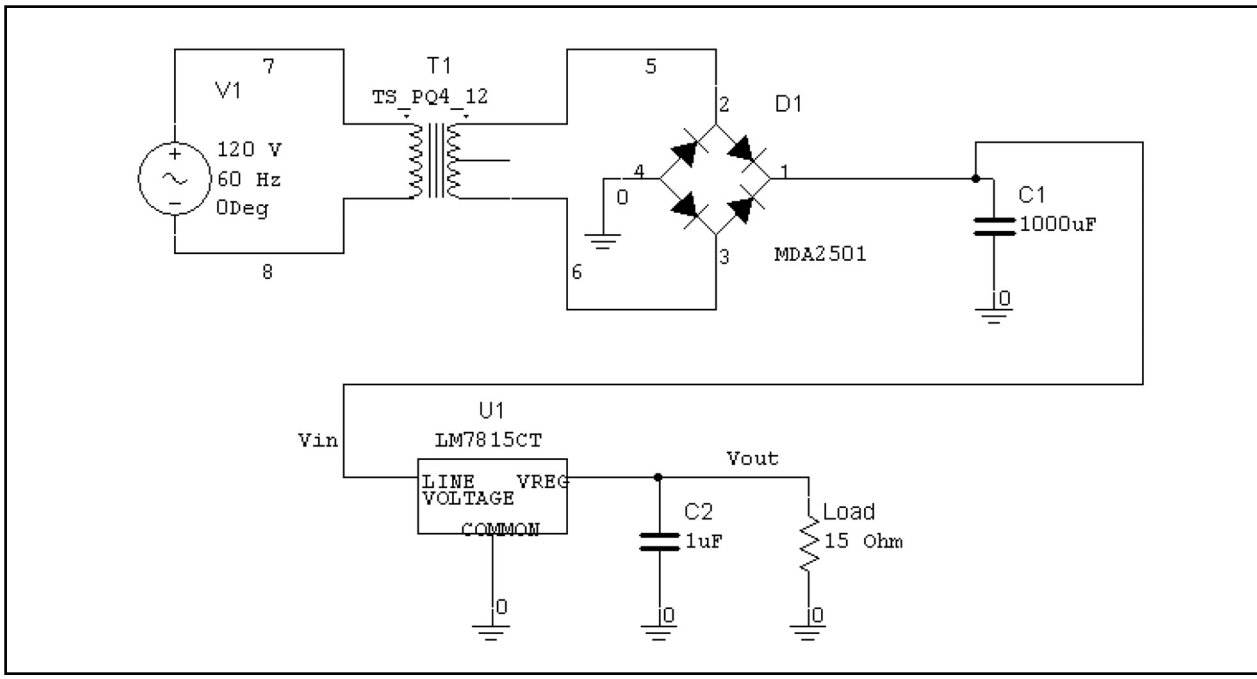
УПРАЖНЕНИЕ 6-5: Проведите моделирование для параллельной RLC-цепи и определите амплитуду и фазу тока через каждый компонент, а также напряжение на резисторе:



РЕШЕНИЕ. Полученные значения равны: $1\angle 0^{\circ}$ А — ток резистора, $0{,}1\angle 90^{\circ}$ А — ток конденсатора, $0{,}1\angle -90^{\circ}$ А — ток на катушке индуктивности, $10\angle 0^{\circ}$ В — напряжение на конденсаторе.

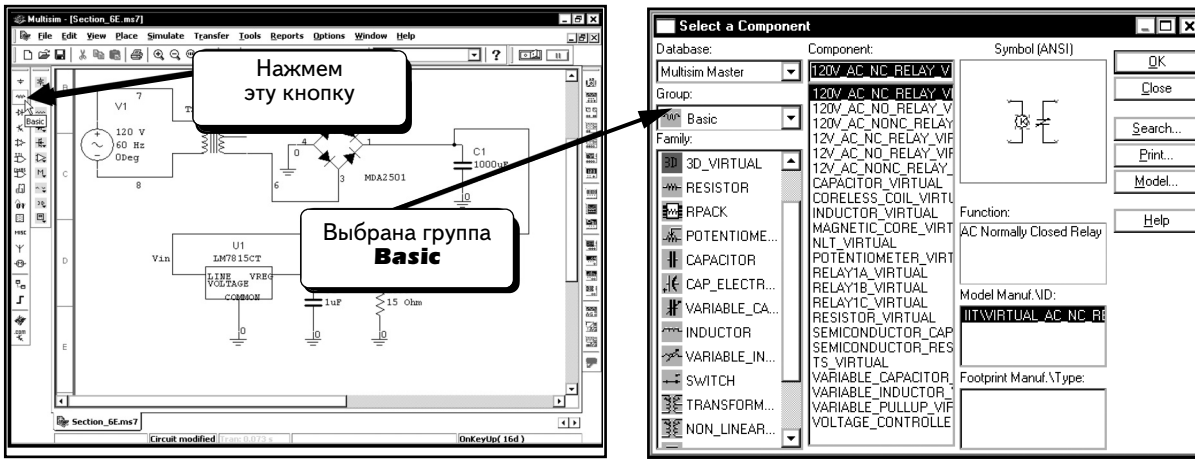
6.5. Стабилизатор постоянного тока

Смоделируем работу стабилизатора постоянного тока. Вот его полная схема:

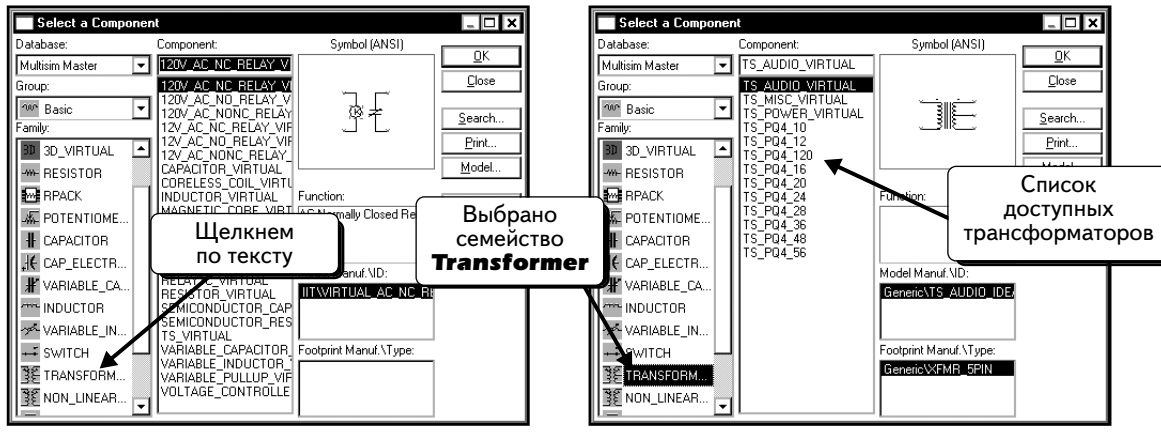


Это — стабилизатор постоянного тока напряжением 15 В, рассчитанный на максимальный ток 1 А. Компонент MDA2501 представляет собой мостовой выпрямитель (bridge rectifier) 25 А, 100 В. Данный компонент рассчитан на более высокий ток, чем необходимо, но это — стандартный элемент в программе Multisim. Такой мост производится различными компаниями, включая International Rectifier (GBPC2501A0), Diodes Incorporated (GBPC2501) и General Semiconductor (GBPC2501). Микросхема серии MDA2501 — это компонент компании Motorola, который сейчас не производится.

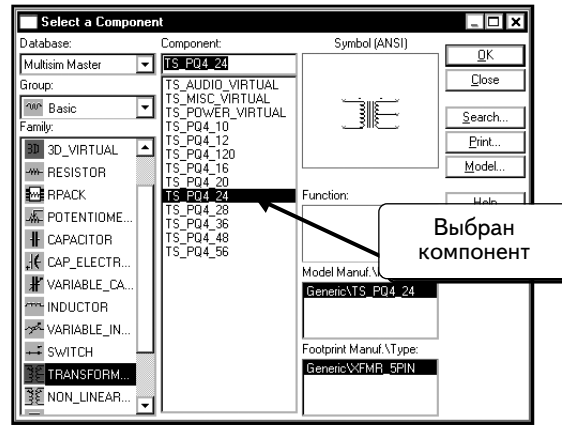
Так как схема содержит три новых компонента, покажем, где их можно найти. Чтобы добавить трансформатор, нажмем кнопку **Basic** Parts **(Базовые компоненты)** и выберем группу **Basic**:



Далее надо выбрать семейство **Transformer (Трансформатор)**, чтобы открыть список доступных трансформаторов:

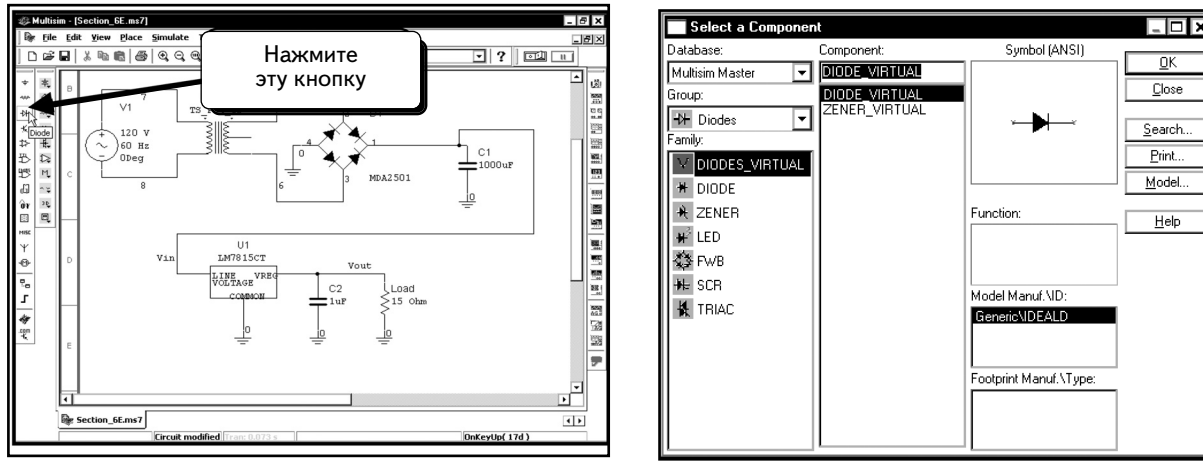


Будем использовать трансформатор на действующее выходное наряжение 24 В. Выберем компонент **TS_PQ4_12**:

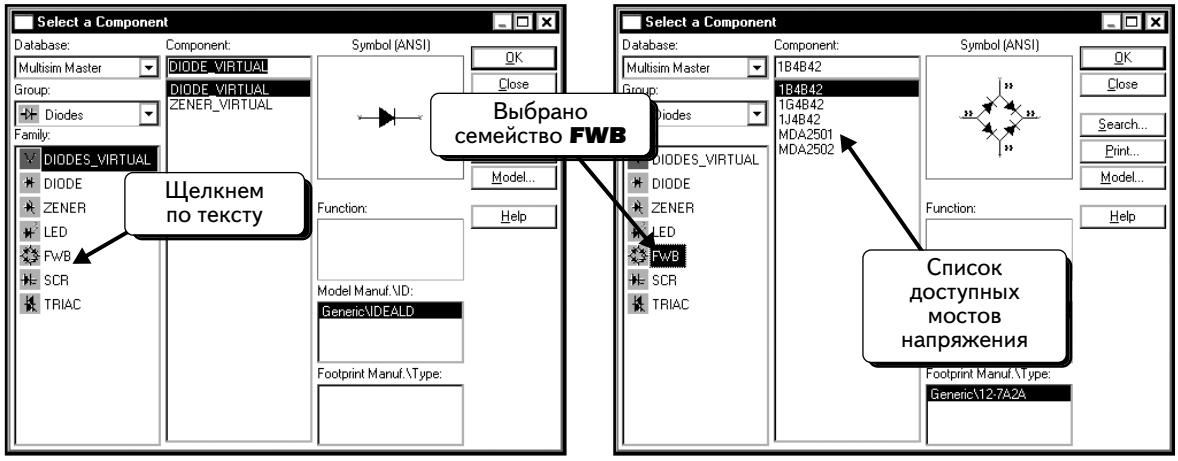


Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить его в схему. В качестве трансформатора используется компонент с отводом от средней точки вторичной обмотки с действующим напряжением каждой полуобмотки в 12 В. Таким образом, действующее значение напряжения между двумя крайними выводами выходной обмотки составляет 24 В; и можно считать, что этот трансформатор относится к трансформаторам с выходным напряжением 24 В. Такая система обозначений отличается от стандартной. Обычно указывается напряжение между двумя крайними выводами, а напряжение полуобмотки получается при делении этого значения на два.

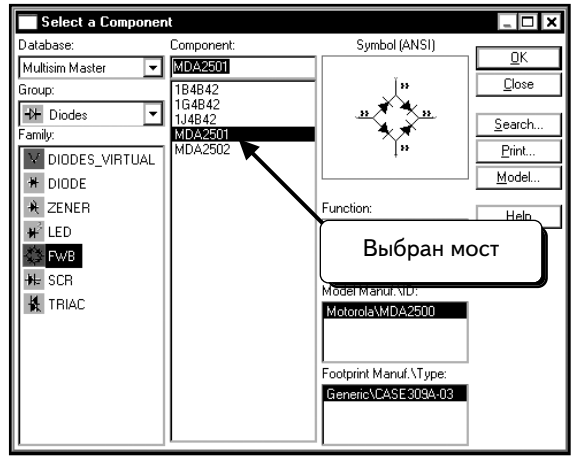
Чтобы включить в схему мост, щелкнем по кнопке **Diode** :



Далее надо выбрать семейство **FWB**, чтобы открыть список доступных выпрямительных мостов:

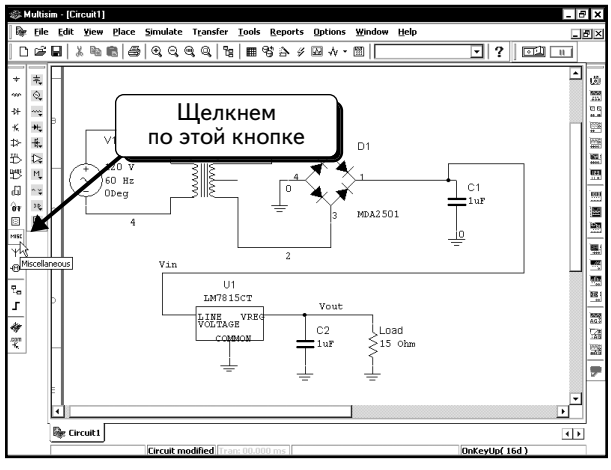


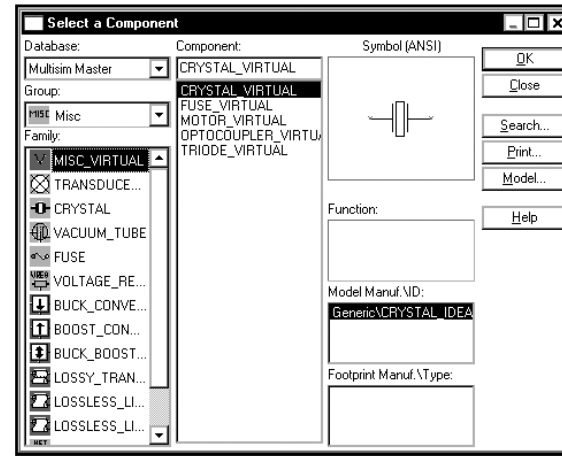
Выберем компонент ***MDA2501***:



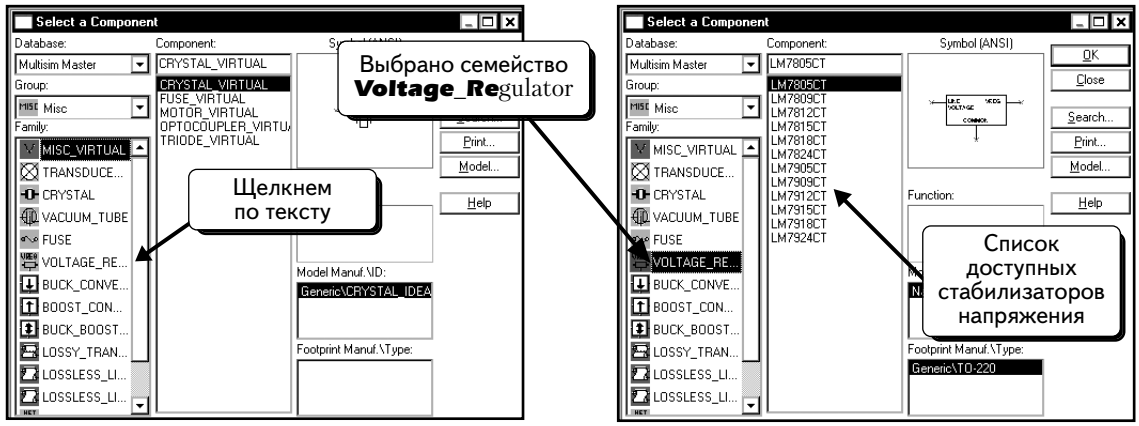
Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент в схему.

Теперь покажем, как добавить в схему непрерывный стабилизатор напряжения 7815. Этот компонент находится в группе **Miscellaneous**. Щелкнем по кнопке ***Misc*** MISC:

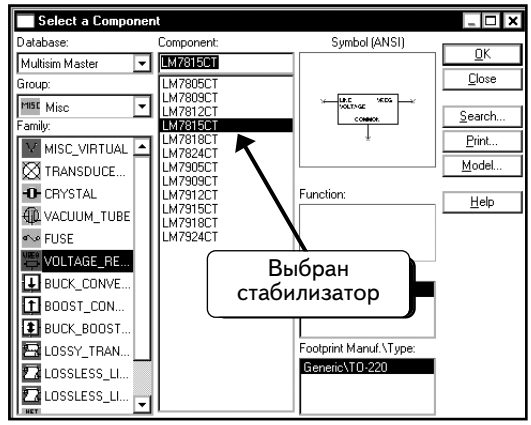




Далее необходимо выбрать семейство ***VOLTAGE_RE***gulator, чтобы открыть список доступных непрерывных стабилизаторов:



Выберем компонент **LM7815C:**

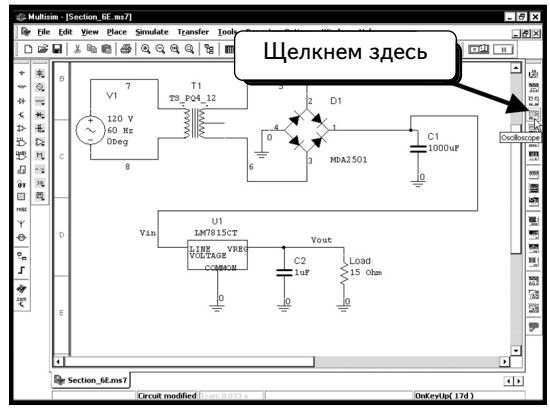


Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент в схему.

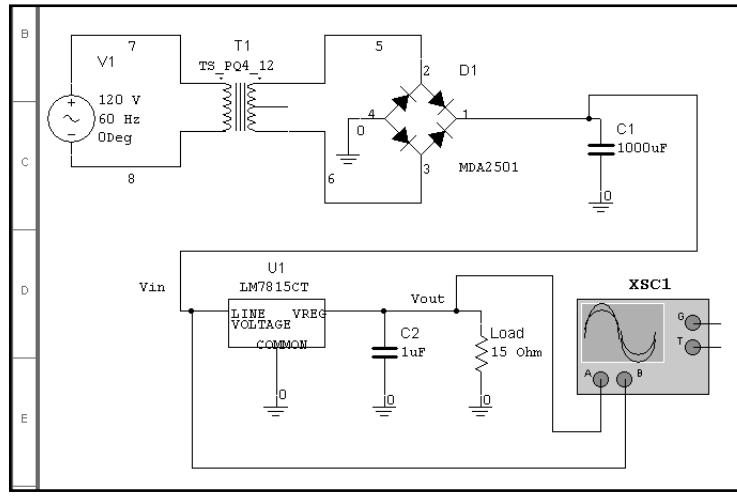
Можно исследовать схему в виртуальной лаборатории с помощью осциллографа, либо с помощью функции SPICE **Transient Analysis**. Виртуальная модель позволяет увидеть схему, а функция SPICE **Transient Analysis** предоставляет информацию о напряжении и токе любого компонента в схеме. Расскажем обо всех доступных методиках.

6.5.1. Непрерывный стабилизатор. Моделирование в виртуальной лаборатории

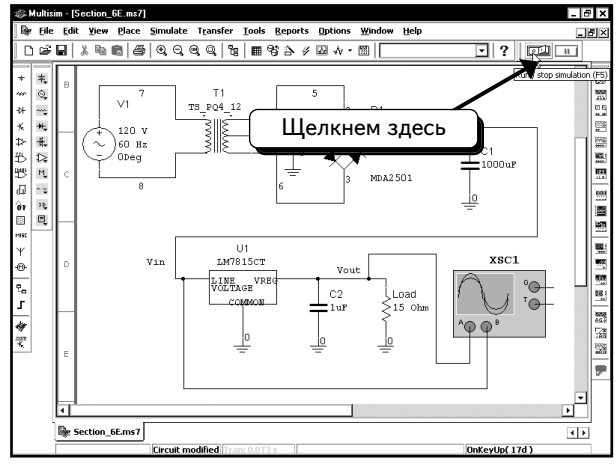
Сначала выполним виртуальное моделирование. Чтобы добавить в схему осциллограф, щелкнем по кнопке **Oscilloscope**:



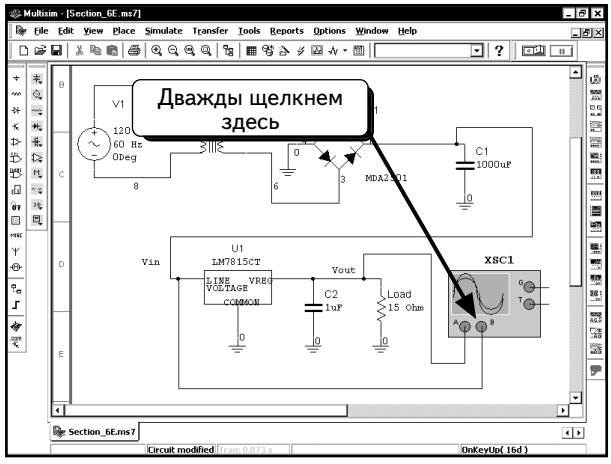
Добавим в схему осциллограф и подключим его так, как показано:

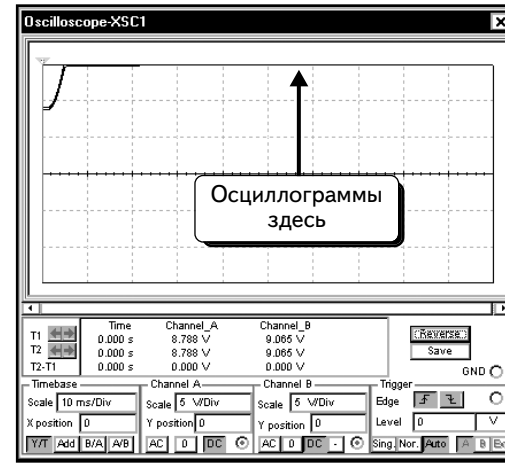


Щелкнем по ***Run/stop simulation*** , чтобы начать моделирование :

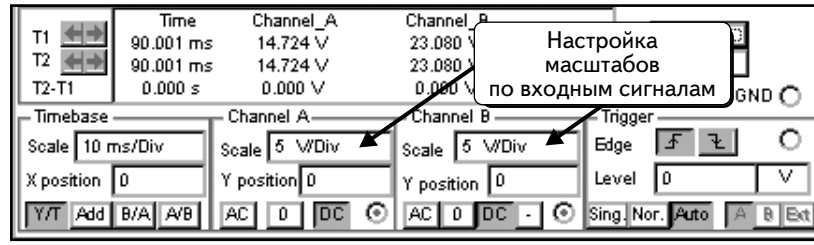


Моделирование будет выполнено, но результаты не будут видны, пока не откроем окно осциллографа. Дважды щелкнем по осциллографу, чтобы открыть его окно:

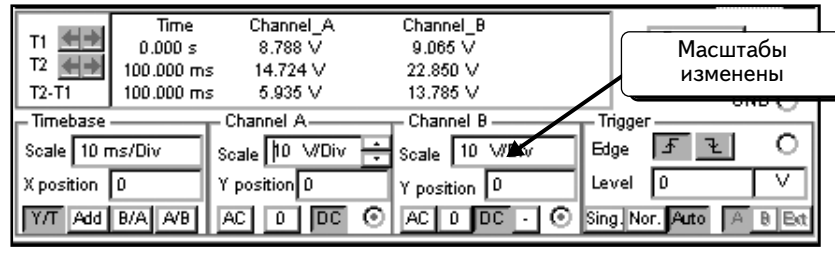




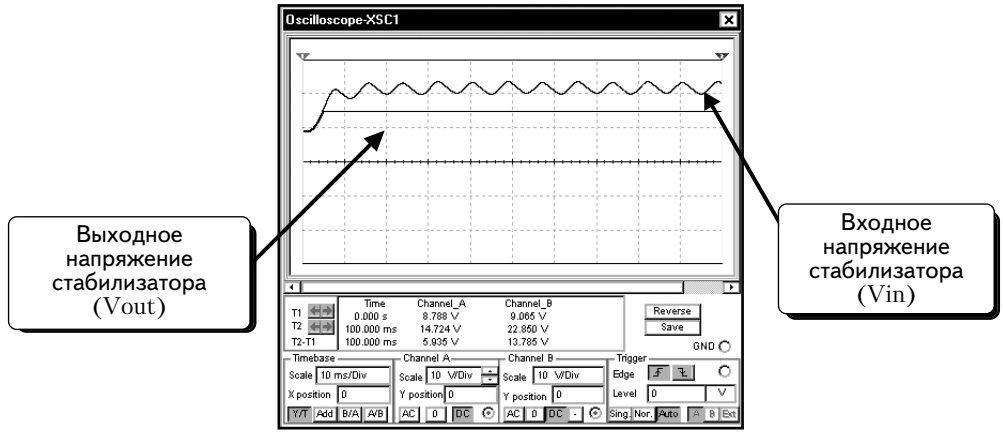
Осциллограммы выходят за пределы экрана. Масштаб для обоих каналов осциллографа составляет **5 V/Div (5 В/дел.)**. Панель управления показана ниже:



Установим масштаб равным **10 V/Div (10 В/дел.)** для обоих каналов **A** и **B**:

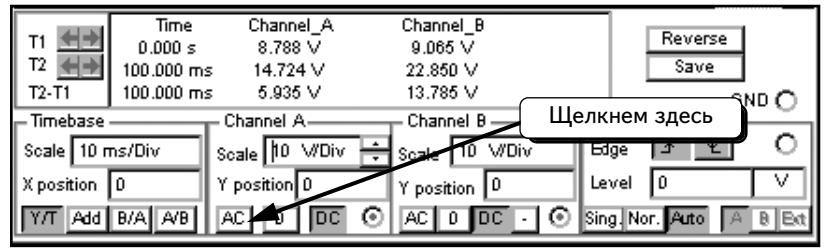


При изменении настроек вид осциллограмм на экране тоже изменится:



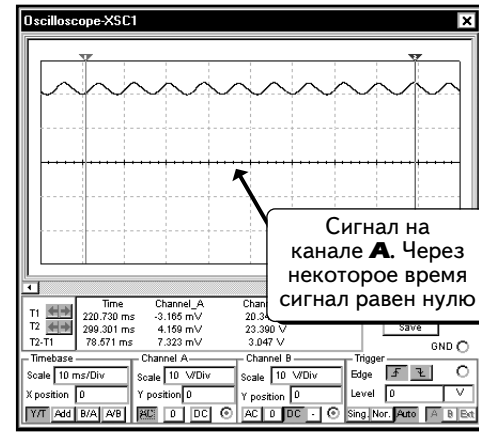
Хотя входное напряжение пульсирует с частотой 120 Гц, выходное напряжение фиксировано на уровне 15 В. Это происходит благодаря наличию стабилизатора напряжения. Пока входное напряжение достаточно велико, выходное напряжение будет постоянным даже при больших пульсациях выпрямленного напряжения.

Если есть желание увидеть пульсации на выходе стабилизатора, то необходимо увеличить масштаб, выбрав, например, **10 mV/Div** (10 мВ/дел.). При такой настройке сигнал 15 В постоянного тока окажется вне экрана осциллографа. Чтобы увидеть переменную составляющую сигнала, переключим осциллограф на режим AC. Щелкнем по кнопке AC для канала **A**, как показано ниже:

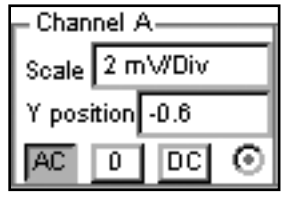


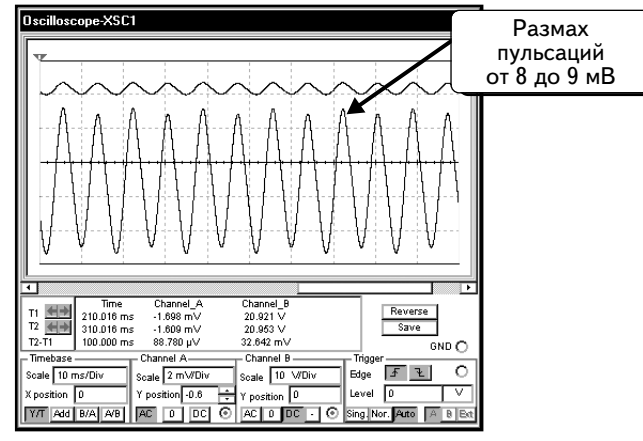
Кривая переместится в центр экрана:





Чтобы увидеть пульсации, еще более увеличим масштаб для канала **A**. Выберем значение **2 mV/Div (2 мВ/дел.)** опции, изменив настройку **Y Position**, немного сдвинем кривую вниз:



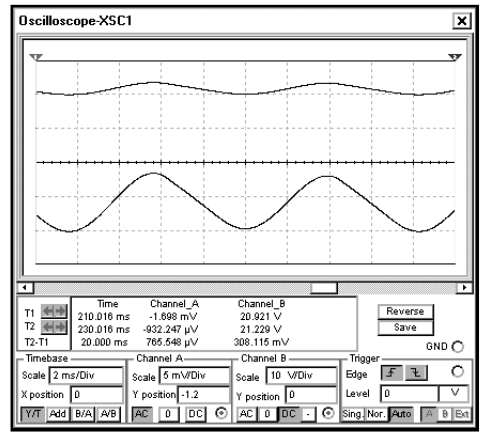


Видно, что пульсация на выходе очень мала по сравнению с пульсацией сглаженного напряжения (на конденсаторе фильтра).

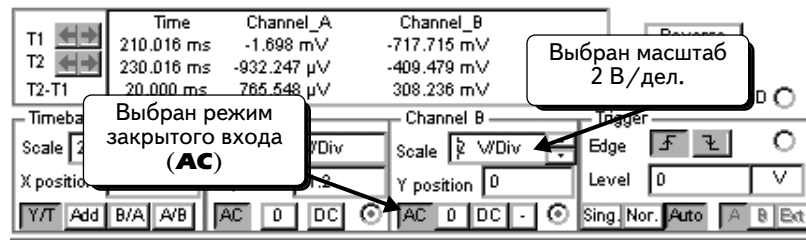
Чтобы понять, как влияет пульсация на входе на выходную пульсацию, надо изменить параметр **Timebase**. Выберем значение **2ms/Div (2 мс/дел.)**. Также изменим масштаб и параметр **Y Position** для канала **A**:



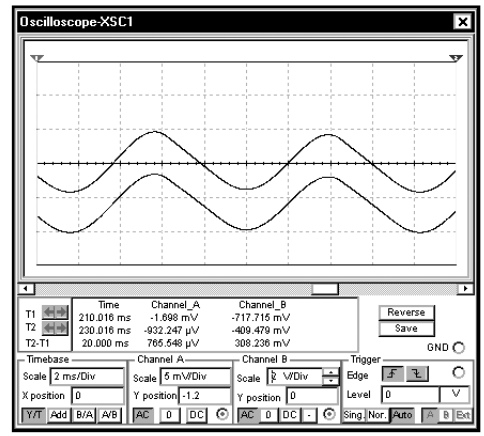
Увидим окно осциллографа, которое приведено ниже:



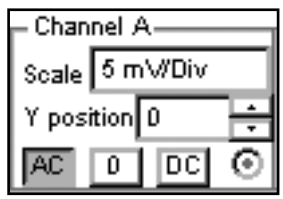
Чтобы отобразить пульсацию на входе, изменим настройки: режим **AC** и масштаб **2 V/Div** (2 В/дел.) для канала **B**:

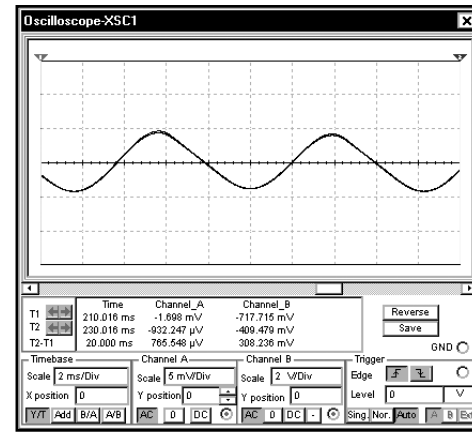


Видно, что пульсации на входе и на выходе практически совпадают:



Если установить параметр **Y position** для канала **A** в ноль, две кривые совпадут друг с другом:





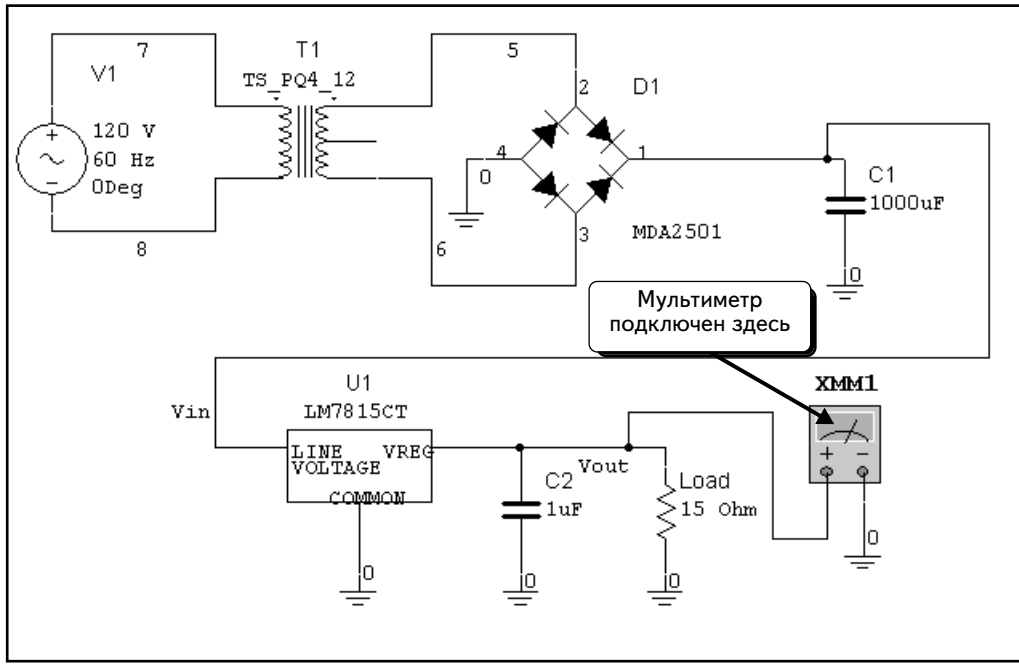
Так как осциллограммы имеют на экране одинаковую амплитуду, а масштаб в В/дел. для канала **B** в 400 раз больше, чем для канала **A**, делаем вывод, что пульсации на выходе регулятора в 400 раз меньше пульсаций на его входе.

Отношение между пульсациями на выходе и входе называется коэффициентом сглаживания пульсаций (ripple rejection ratio). В децибелах он определяется как:

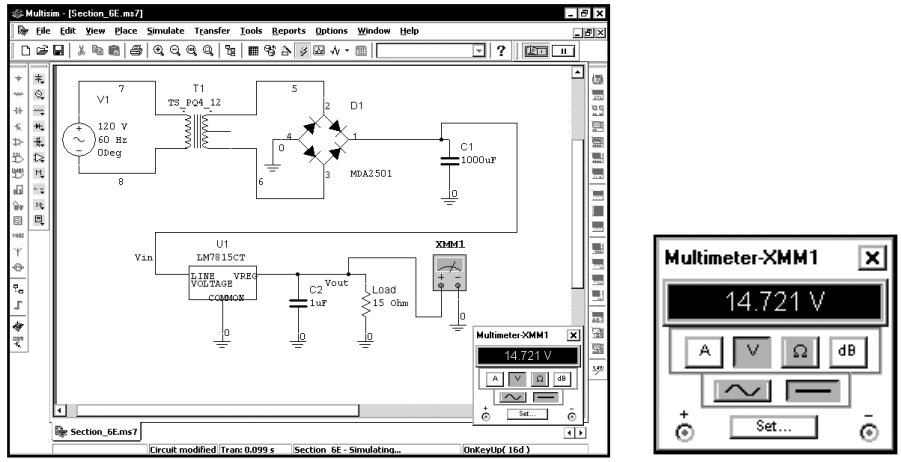
$$K_{сгл} = 20\log_{10}(\Delta Vin/\Delta Vo).$$

В нашем примере отношение ΔVin/ΔVo составляет 400, что соответствует 52 дБ. В справочных данных компании National Semiconductor на микросхему LM7815C указано, что коэффициент сглаживания имеет минимальное значение, равное 54 дБ, и стандартное значение, равное 70 дБ. Следовательно, модель LM7815CT программы Multisim дает значение, почти равное минимальному значению для компонента LM7815C по справочным данным National Semiconductor.

Наконец, надо проверить постоянную составляющую напряжения на выходе. Для этого можно использовать курсоры осциллографа. Однако выберем другой способ, измерив напряжение на выходе мультиметром. Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы остановить моделирование. Закроем окно осциллографа и подключим к схеме мультиметр (Как работать с мультиметром, показано в разделе 3.1.2.):



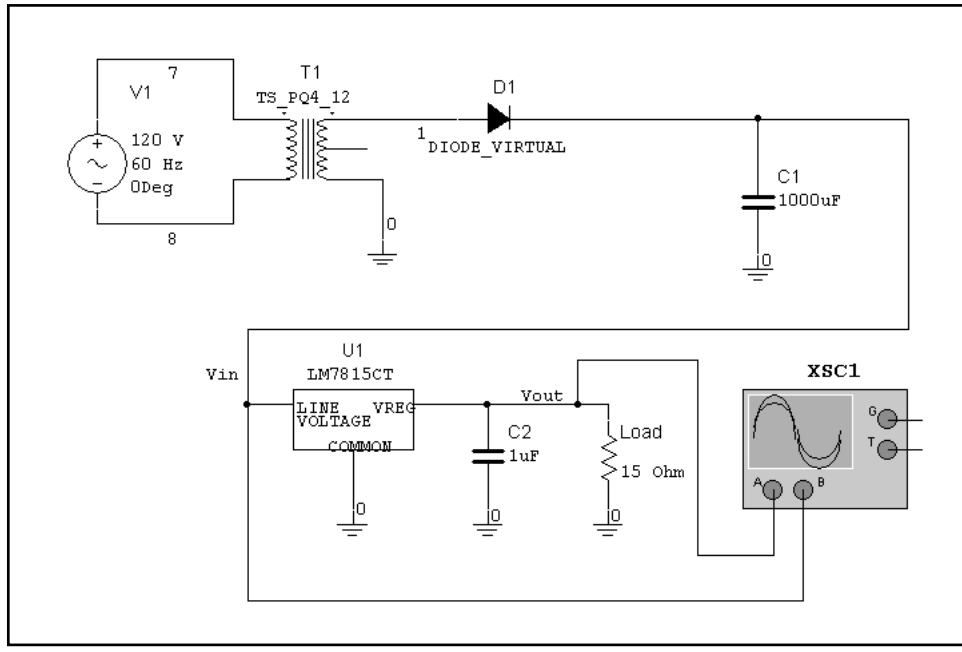
Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы выполнить моделирование. Дважды щелкнем по мультиметру, чтобы открыть его окно. Выберем опцию **DC Voltage (Напряжение постоянного тока)**. Через некоторое время прибор покажет напряжение DC на выходе. В данном примере значение составляет **14,721** В:



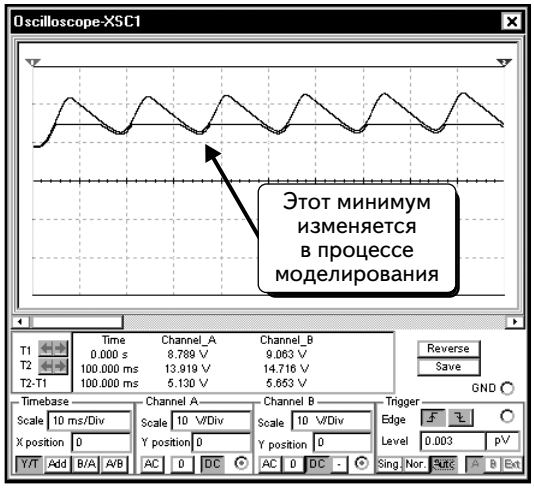
В справочных данных компании National Semiconductor на LM7815C указано, что выходное напряжение находится в диапазоне от 14,4 до 15,6 В. Следовательно, полученное значение находится в допустимом диапазоне.

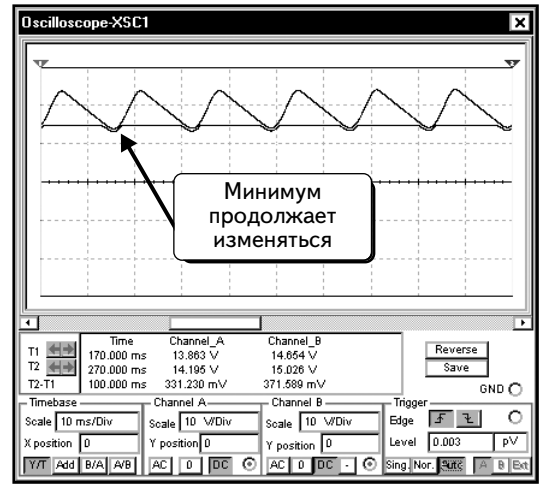
УПРАЖНЕНИЕ 6-6: С помощью выпрямителя и стабилизатора смоделируйте источник питания. Используйте схему, показанную на с. 353, но используйте однополупериодный выпрямитель вместо двухполупериодного. Добавьте виртуальный диод, так как в библиотеке программы Multisim отсутствует диод на требумый ток. Остальные компоненты должны совпадать.

РЕШЕНИЕ:

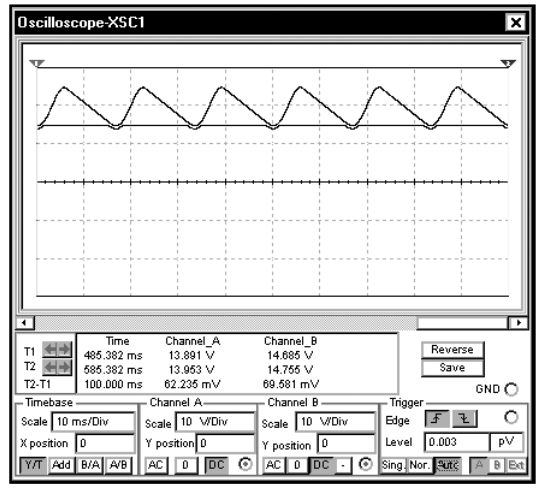


Выполните моделирование и отобразите результаты в окне осциллографа. Нужно установить режим моделирования на длительное время, пока выходное значение регулятора не достигнет установившегося значения. При первом запуске моделирования будут видны осциллограммы на входе и выходе регулятора, которые схожи с показанными ниже:



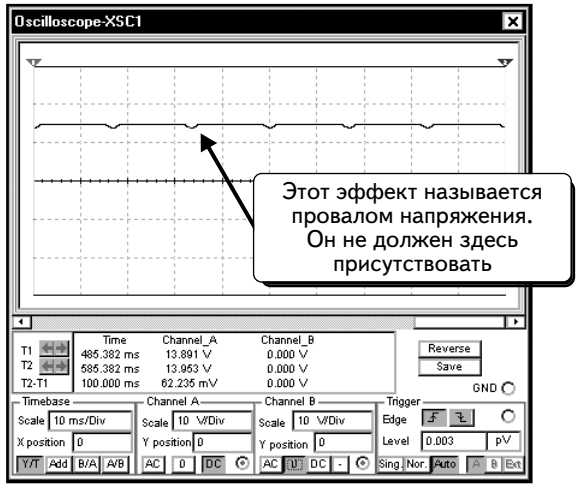


В процессе моделирования минимальное значение напряжения на конденсаторе увеличивается:



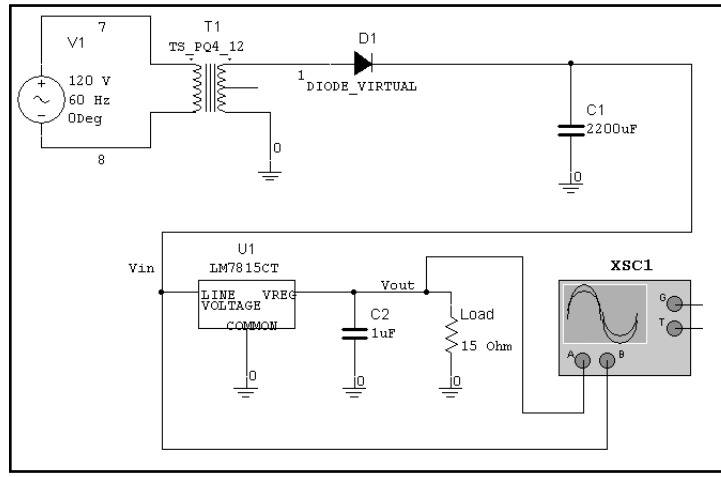
Пульсация напряжения на выходе стабилизатора уменьшается, так как напряжение на входе стабилизатора возросло.

Провалы в выходном напряжении стабилизатора не исчезнут, так как входное напряжение регулятора слишком мало:

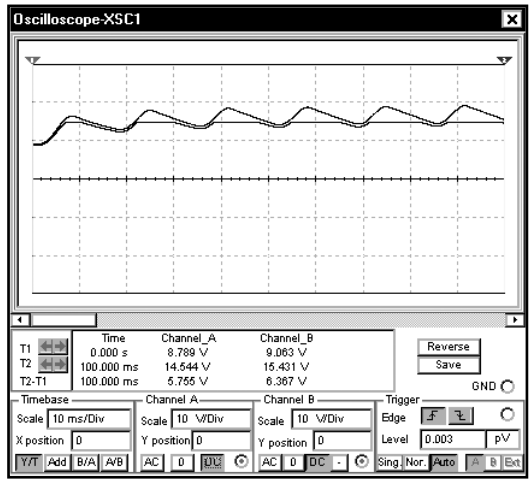


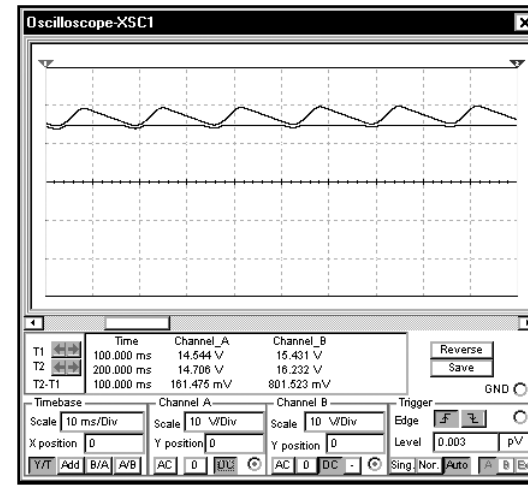


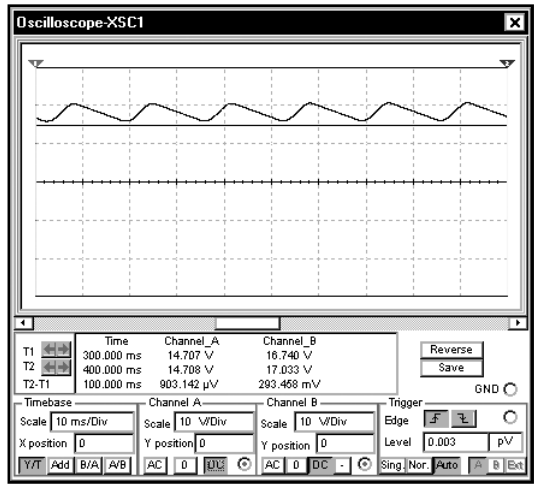
Причина состоит в том, что для однополупериодного выпрямителя используется конденсатор слишком малой емкости. Чтобы решить проблему, можно выбрать трансформатор с более высоким напряжением или увеличить емкость конденсатора. Стандартные конденсаторы имеют значения 1200, 1500, 1800 и 2200 мкФ. Выберем конденсатор 2200 мкФ :

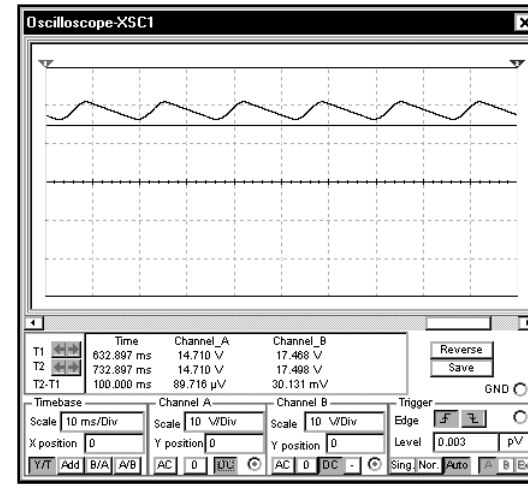


Моделирование показывает, что теперь выходное значение близко к 15 В, а пульсация очень невелика. Необходимо установить достаточно большое время моделирования, чтобы был достигнут установившийся режим работы:

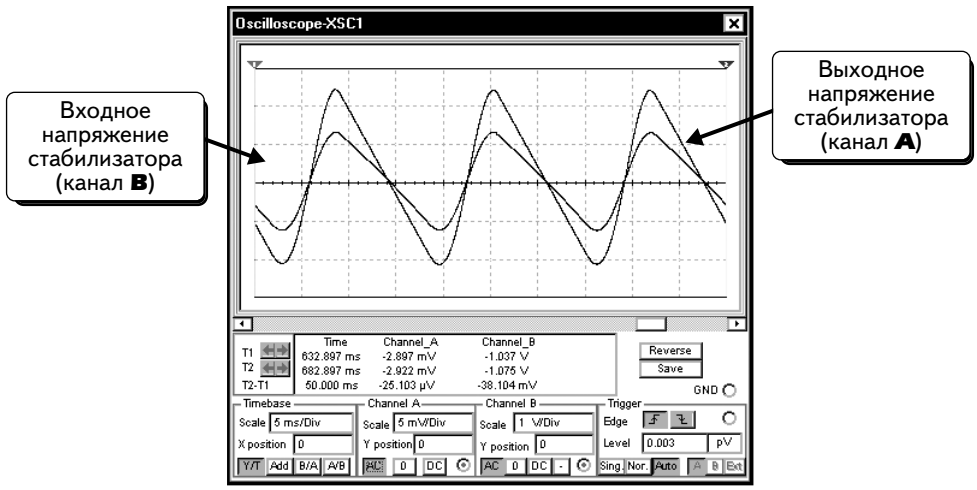








Осциллограммы показывают, что схема функционирует правильно, так как выходное напряжение стабилизатора установилось и составляет 15 В. Тем не менее, схеме понадобилось несколько циклов, чтобы достичь установившегося выходного напряжения. Если мы переключим режим осциллографа на AC, то увидим пульсации на входе и на выходе стабилизатора:

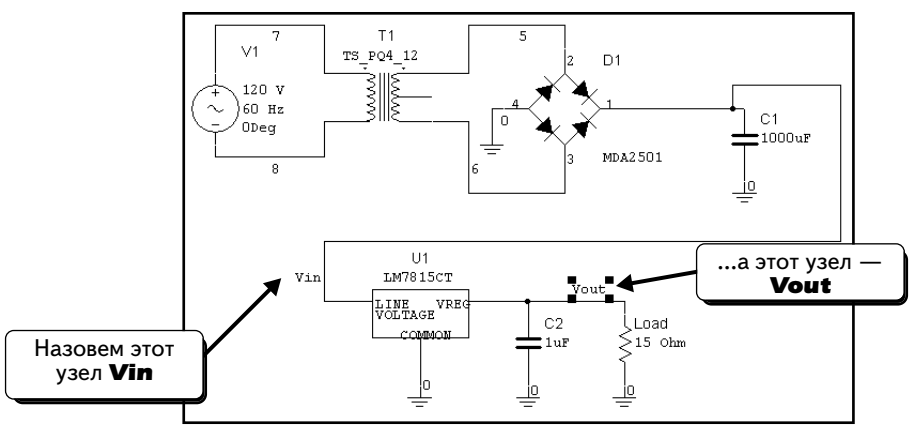


6.5.2. Непрерывный стабилизатор напряжения. Моделирование с использованием функции SPICE Transient Analysis

Виртуальная модель Multisim показала, каких результатов можно добиться, если создать в лаборатории стабилизатор постоянного тока и измерить напряжение с использованием осциллографа и мультиметра. Предыдущие примеры позволили научиться подключать инструменты — осциллограф и мультиметр, а также настраивать эти приборы для получения осциллограмм и измерения напряжения. Виртуальные приборы подключаются так же, как и обычные лабораторные приборы. Таким образом, виртуальная модель позволяет решить несколько задач: дает возможность собирать схемы так же, как в реальной лаборатории; попрактиковаться в подключении и настройке инструментов по той же методике, которая используется в лаборатории; и, наконец, получить результаты, которые показывают, как работает схема. Используя результаты моделирования, можно определить, правильно ли функционирует схема.

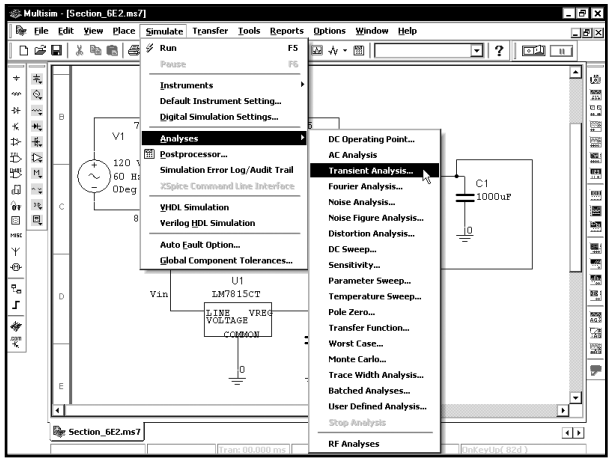
Моделирование с применением функции **Transient Analysis** используется только для анализа схемы, причем результаты отображаются на графике, а не на экранах приборов. Задача данной функции состоит в том, чтобы выполнить анализ схемы и сообщить пользователю, правильно ли она работает. Большинство программ, использующих моделирование SPICE имеют только функцию **Transient Analysis** и не поддерживают моделирование с помощью виртуального осциллографа. Результаты совпадают в обоих случаях. Покажем примеры моделирования виртуального и с применением функции **Transient Analysis**; это позволит понять различия между тестированием в лабораторных условиях, виртуальным моделированием Multisim и стандартным моделированием SPICE **Transient Analysis.**

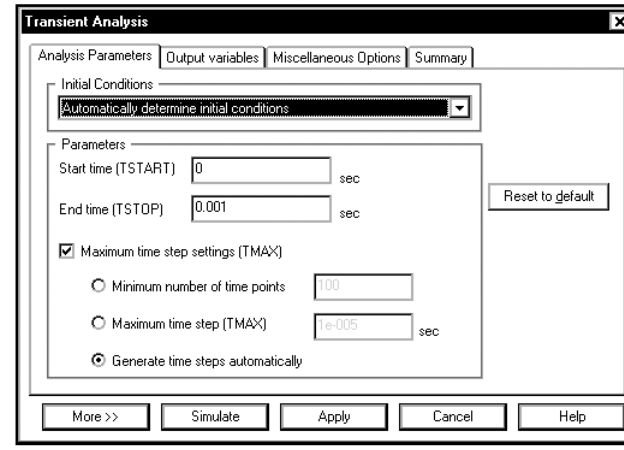
Сначала создадим схему, разработанную в разделе 6.5:



Обратите внимание: узлы на входе и выходе стабилизатора обозначены как **Vin** и **Vout**. Чтобы пометить узел, дважды щелкнем по проводу и введем название для провода. Метки могут быть не такими, как показано, тем не менее, пометить эти два узла необходимо.

Настроим функцию **Transient Analysis**. Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis**:





Опция **End time (Время завершения)** задает общее время моделирования. Моделирование выполняется в диапазоне времени, определенном параметрами **Start time (Время начала)** и **End time**. Предположим, что моделирование прошло 10 периодов осциллограммы при частоте 60 Гц. Период данной осциллограммы составляет 1/60 с. Десять периодов занимают примерно 160 мс или 0,16 с.

Настройки **Maximum time step (Максимальный шаг по времени)** определяют промежуток времени между точками моделирования. Если выбрать значение **Generate time Steps Automatically (Создавать шаги по времени автоматически)**, программа Multisim будет выбирать максимально большие промежутки между точками моделирования; при этом ошибки в моделировании будут удерживаться в диапазоне ниже заданного максимума. В результате количество точек моделирования будет минимальным, а это позволит завершить моделирование за минимально возможное время. Данная опция полезна для продолжительных сеансов моделирования, которые могут занимать несколько часов. Проблема заключается в том, что точки моделирования связаны друг с другом отрезками прямых. Если точек моделирования слишком мало, кривые будут выглядеть угловатыми, а точность результатов будет сомнительной, так как настоящие осциллограммы бывают только плавными.

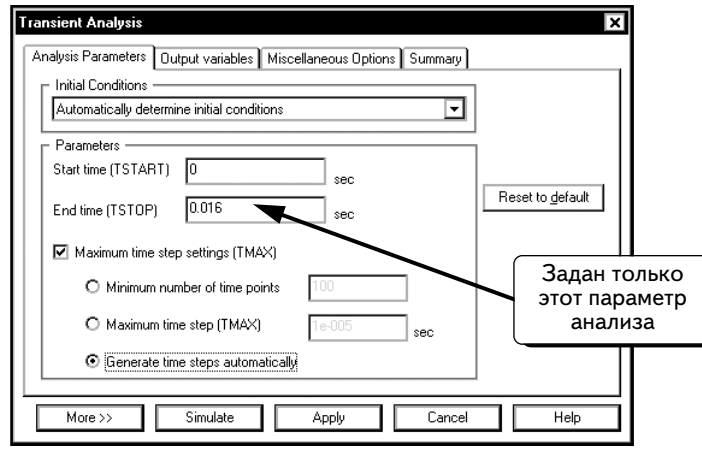
Для решения данной проблемы, можно задать большое количество точек для моделирования. Опция **Minimum number of time points** (Минимальное количество точек по времени) позволяет указать минимальное количество точек для всего моделирования. Например, если выбрать значение 10 000, модель будет включать не менее 10 000 точек. Максимальный промежуток времени между точками моделирования определяется по формуле:

Максимальное время = (TSTOP–TSTART)/минимальное количество точек.

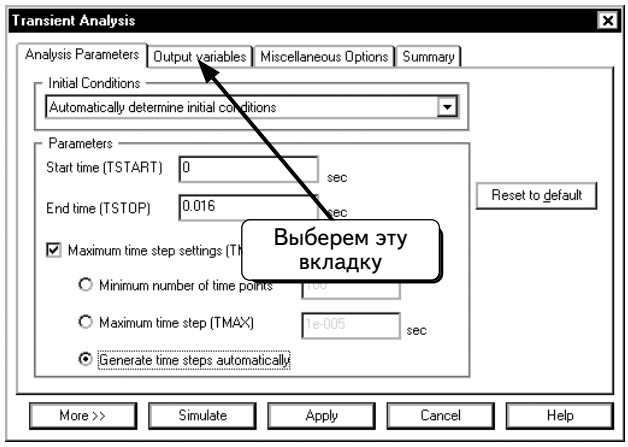
Например, если настроить параметр **TSTART** на 0, параметр **TSTOP** — на 1 с, а также указать минимальное количество точек, равное 1000, то максимальный промежуток времени между точками моделирования составит 1 мс.

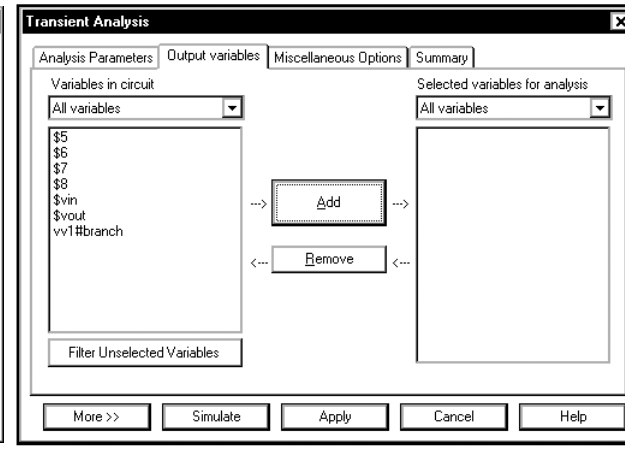
Второй способ заключается в том, чтобы выбрать значение для опции **Maximum time step (TMAX)**. Эта опция определяет максимальный промежуток времени между точками моделирования. Данный параметр используется в большинстве сеансов анализа Spice **Transient Analysis**. К примеру, если хотим, чтобы максимальный промежуток времени между точками моделирования составил 1 мс, следует выбрать значение 0,001.

При первом моделировании стабилизатора постоянного тока не будем работать с этими опциями и позволим программе Multisim выбирать значения автоматически. В итоге увидим, как программа Multisim решает задачу самостоятельно, а также отметим, что произойдет, если не указать максимальный промежуток времени между точками моделирования. Введем данные в диалоговом окне, как показано ниже. Так как каждый период занимает около 16 мс, сеанс моделирования составит примерно 10 периодов входного напряжения при частоте 60 Гц:

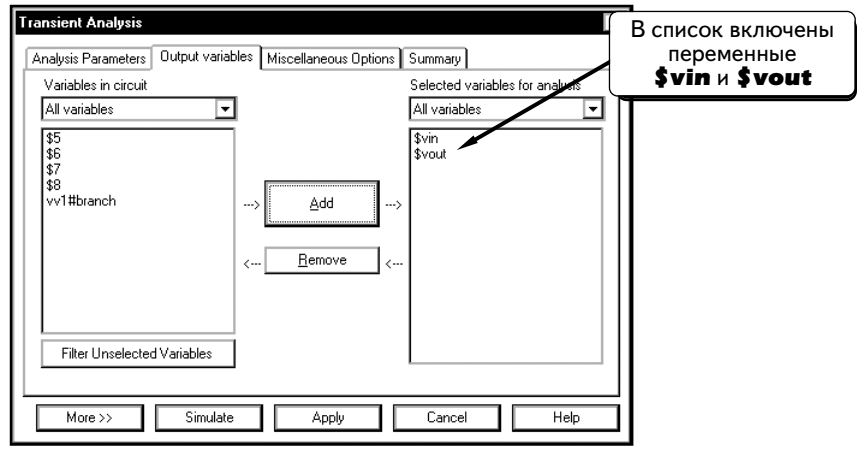


Укажем, какие кривые следует отобразить. Щелкнем по вкладке **Output variables:**

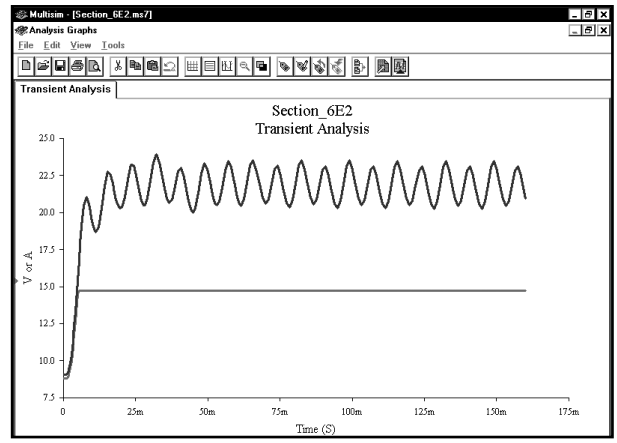




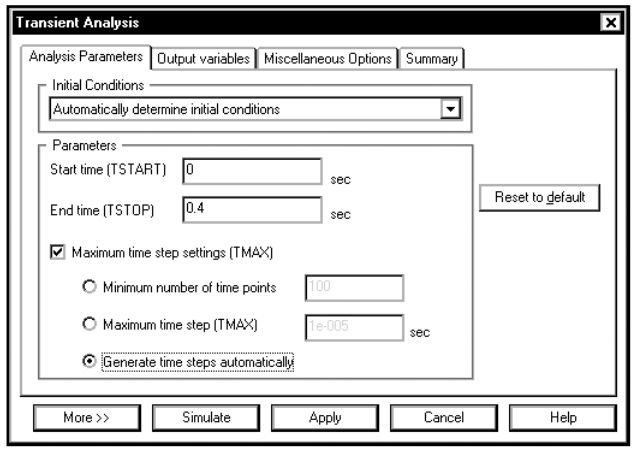
Выделим переменные **$vin** и **$vout**:

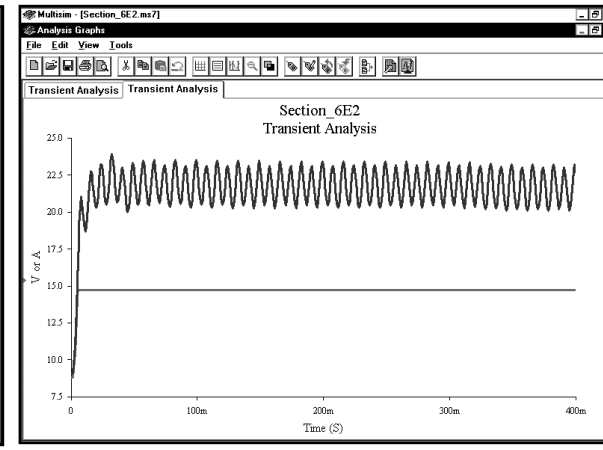


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Программа Grapher автоматически отобразит кривые **$vin** и **$vout**:



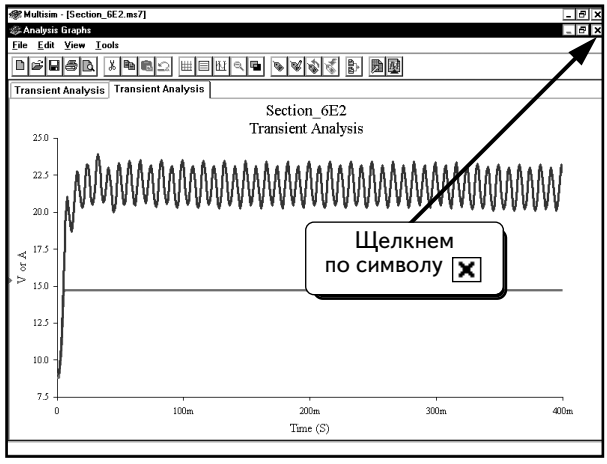
Кажется, что выходное напряжение стабилизировалось на уровне 15 В, как и планировалось. Однако осциллограмма выходного напряжения выглядит не совсем правильно. Как и предполагалось, частота пульсации составила 120 Гц, но полученная пульсация нестабильна. Если повторить моделирование на интервале 0,4 с, пульсация не будет уменьшаться:

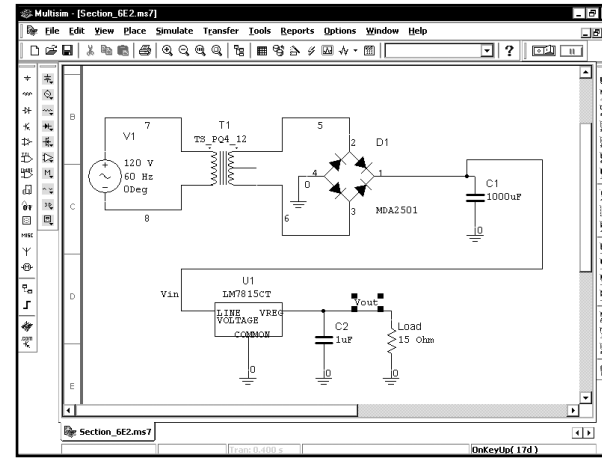




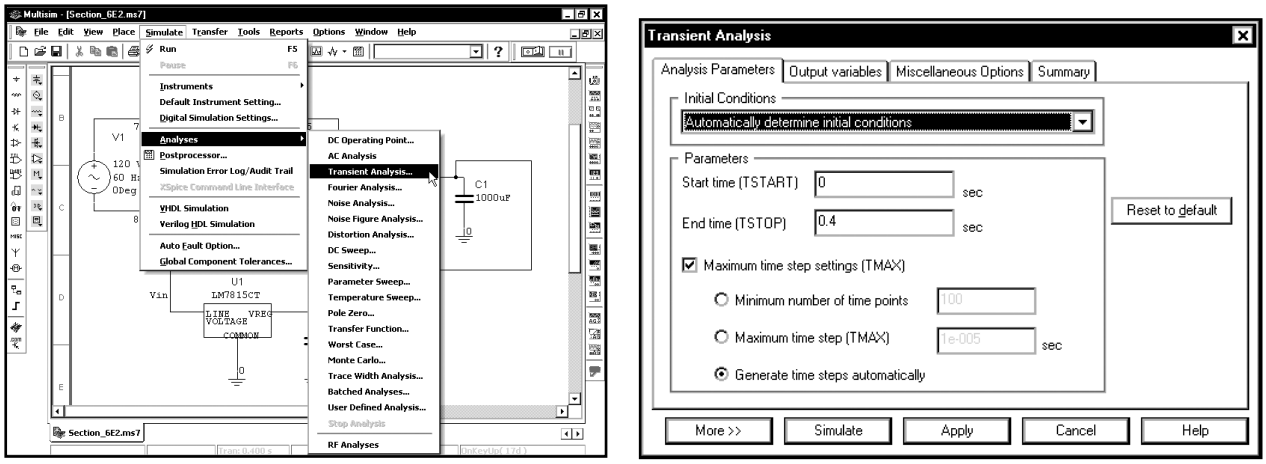
Как видим, пульсация напряжения на конденсаторе не повторяется, а полученное значение не верно. Мы знаем, что пульсация на входе регулятора должна периодически повторяться с частотой 120 Гц.

Модель получилась неправильной, так как программа Multisim выбирает слишком большой промежуток времени между точками моделирования. Чтобы решить проблему, укажем максимальный промежуток времени. Щелкнем по символу ☒, чтобы закрыть окно Grapher:



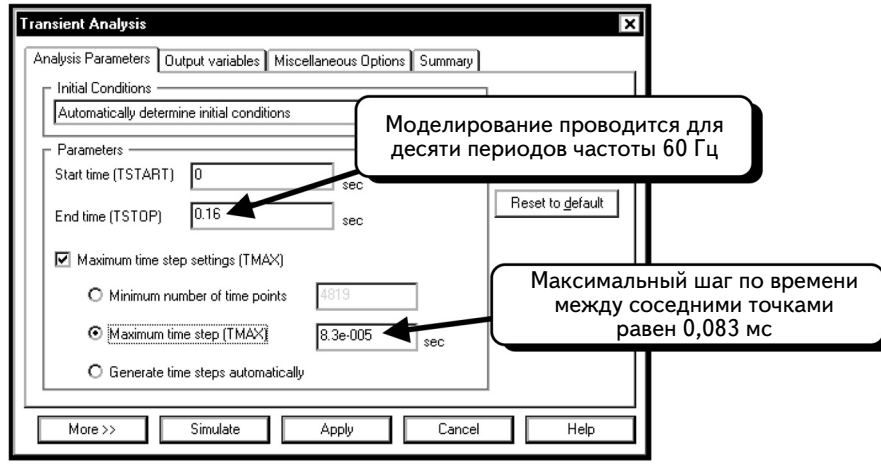


Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis**, чтобы открыть диалоговое окно **Transient Analysis Setup**:



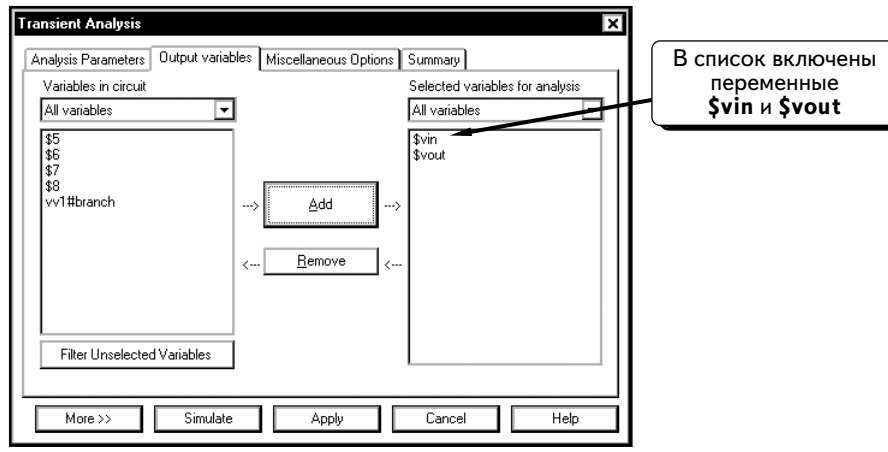
Мы хотим, например, указать максимальный промежуток времени между точками моделирования. Но как выбрать нужное значение? Общий принцип состоит в том, чтобы выбрать большое значение и выполнить моделирование. Изучим результаты, уменьшим значение и повторим моделирование (с использованием коэффициента 10 или меньше). Сначала будет заметно различие между результатами моделирования. При уменьшении максимального промежутка времени это различие будет постепенно сходить на нет. Определив диапазон значений, при которых результаты моделирования совпадают, выберем наибольшее из них. При желании можно использовать и меньшее значение (но это может привести к ошибке округления), увеличить время моделирования и размер файлов с результатами расчета.

Не будем применять этот метод здесь. Имея большой опыт в моделировании источников питания постоянного тока, автор может сразу определить, какое значение необходимо использовать (вам же может помочь и опыт моделирования стандартных схем). Выберем параметры так, чтобы каждый период при частоте120 Гц содержал не менее 100 точек моделирования. Период колебания при частоте 120 Гц составляет 1/120 с или 8,33 мс. Чтобы данный период включал 100 точек моделирования, максимальный промежуток времени между точками моделирования должен равняться 100 мс/120, то есть 0,083 мс, или 83e-6. Изменим, как показано, настройки в диалоговом окне:

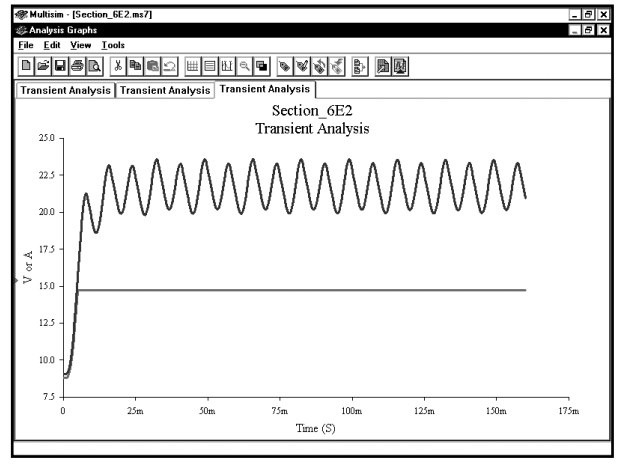


Параметры настроены на моделирование схемы в течение 10 периодов при частоте 60 Гц. Максимальный промежуток времени между точками моделирования равен 0,083 мс (или около 100 точек в осциллограмме с частотой пульсаций 120 Гц).

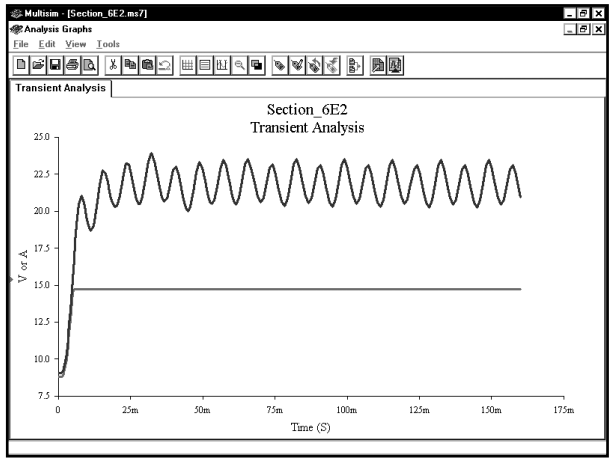
Выходные переменные должны совпадать с переменными из предыдущей модели. Убедимся в этом. Щелкнем по вкладке **Output variables** и проверим, присутствуют ли в списке переменные **$vin** и **$vout** :

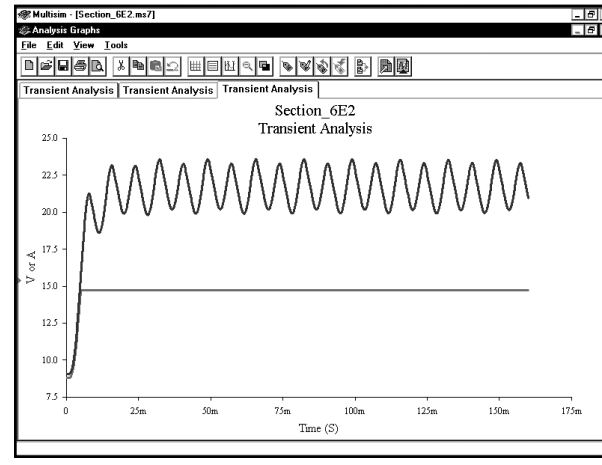


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Кривые **$vin** и **$vout** отобразятся автоматически:



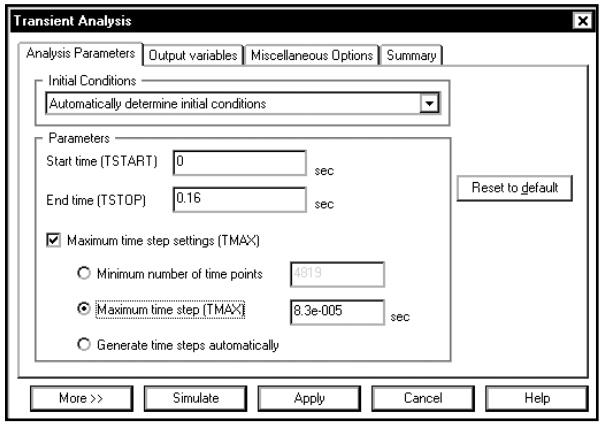
Результат выглядит лучше, но пульсация по-прежнему не совсем стабильна. Сравнение результатов показано ниже: слева то, что получилось при автоматической настройке шага, справа — результат при ручной настройке шага на 8.3e-5 с:

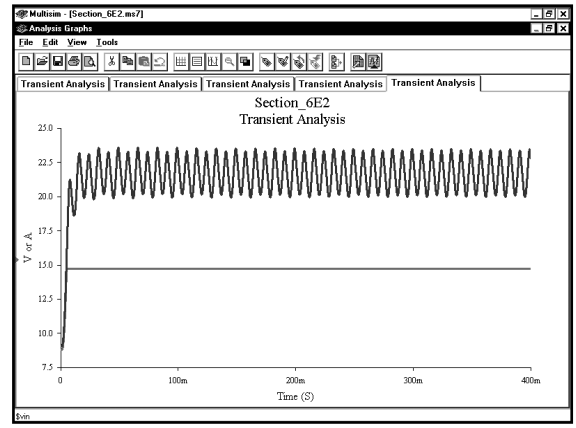




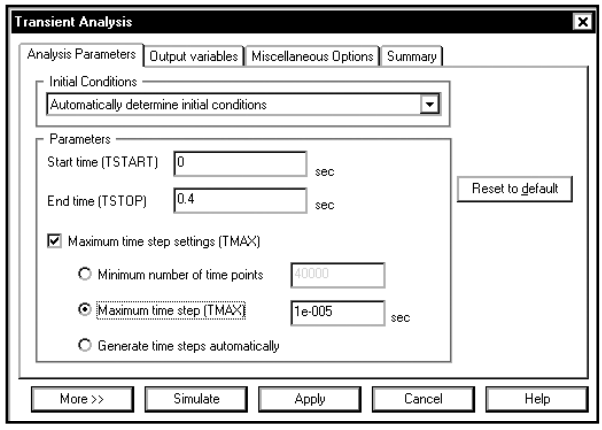
Видно небольшое отличие в верхних кривых.

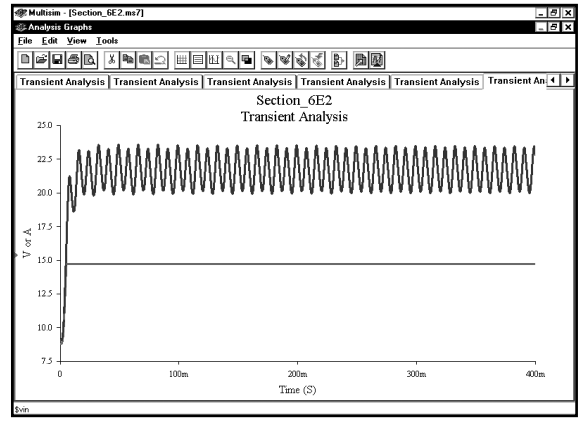
Далее повторим моделирование, предварительно изменив время завершения на 0,4 с:





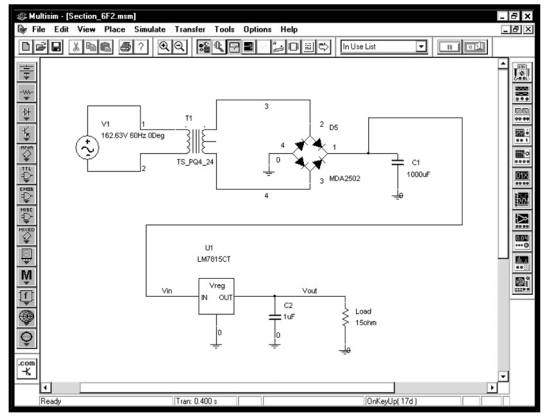
Пульсация сигнала **vin** выглядит стабильной, но для полной уверенности изменим максимальный промежуток времени на 10 мкс и повторим моделирование:



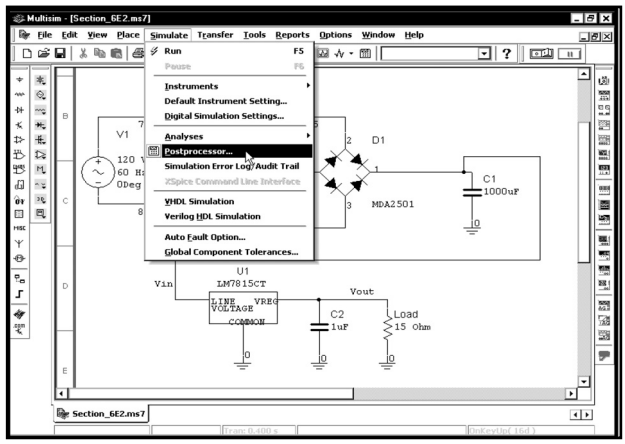


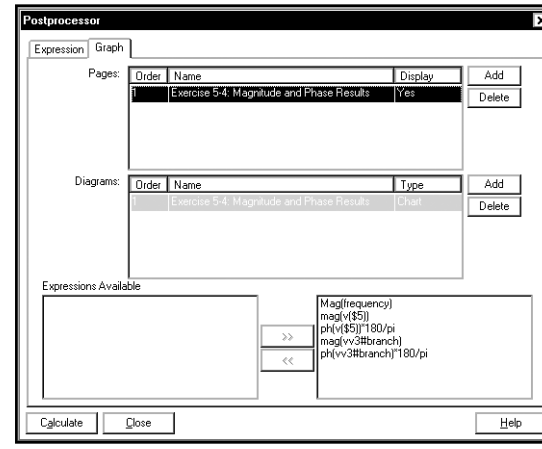
Результаты выглядят такими же, как и при использовании максимального промежутка времени в 0,083 мс; из этого делаем вывод, что значение 0,083 мс является достаточным. При более внимательном изучении результатов заметно небольшое отличие, однако на графиках кривые при значении 10 мкс и 0,083 мс совпадают. Восстановим предыдущее значение (0,083 мс), повторим моделирование и изучим осциллограммы. Можно использовать данные, полученные при моделировании, с использованием настройки 10 мкс, но не советуем этого делать, потому что обработка графиков на компьютере займет больше времени.

Посмотрим на осциллограмму пульсаций. Чтобы получить пульсации входного и выходного напряжений, а затем сравнить их, создадим новую страницу в программе Postprocessor и отобразим кривые входного и выходного напряжения на разных графиках. Нажмем клавиши Ctrl+G, чтобы закрыть окно Grapher. Сначала создадим схему в программе Multisim. Допустим, что моделирование уже было выполнено и данные доступны для программы Postprocessor:

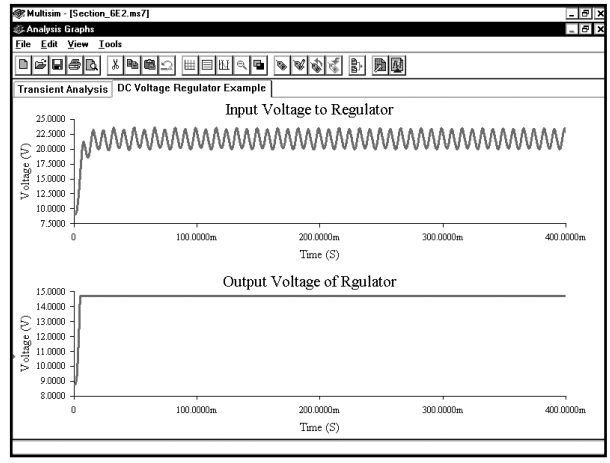


Выберем в меню пункты **Simulate ⇒ Postprocessor**:

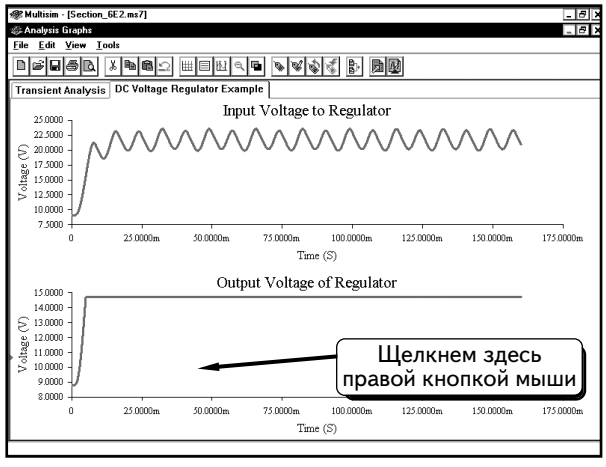


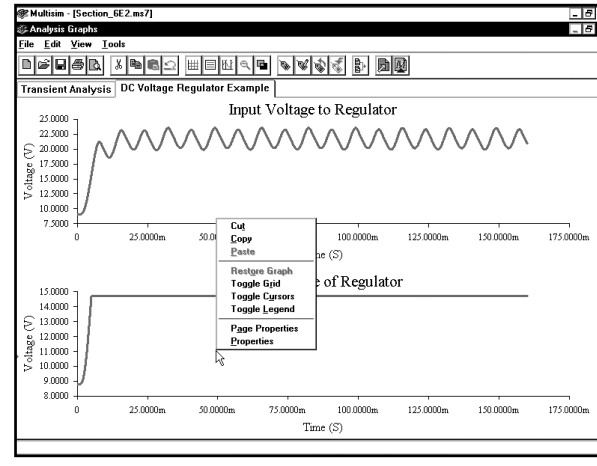


С помощью программы Postprocessor отобразим осциллограммы входного и выходного напряжений регулятора (если вы не знаете, как работать с программой Postprocessor, обратитесь к главе 2):

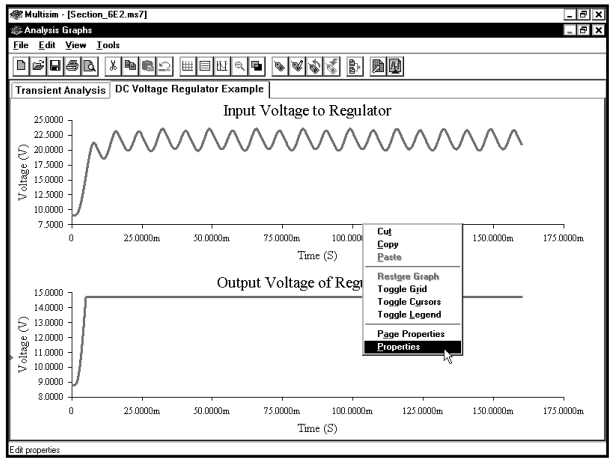


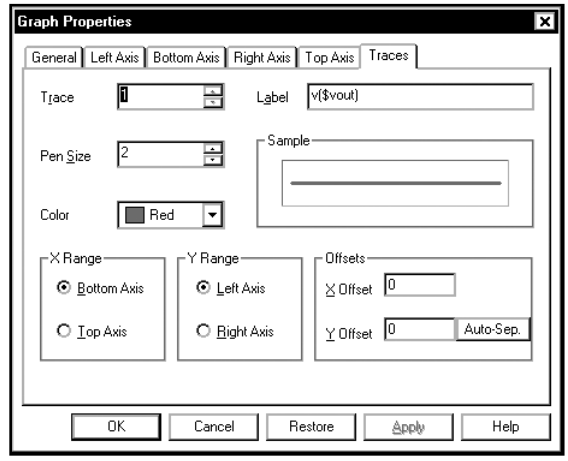
Чтобы увидеть пульсацию на выходе регулятора напряжения, необходимо изменить масштаб по оси y для нижнего графика. Для этого щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по нижнему графику:



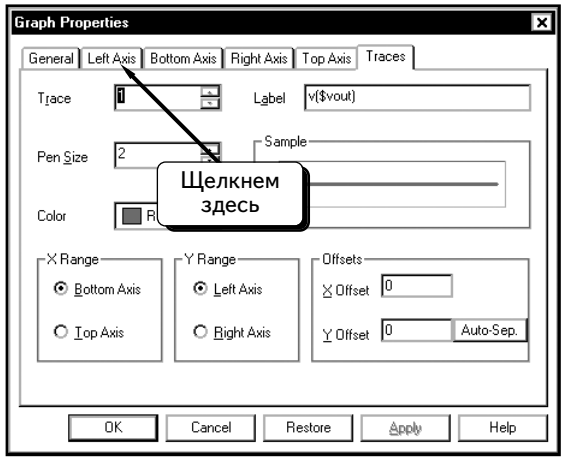


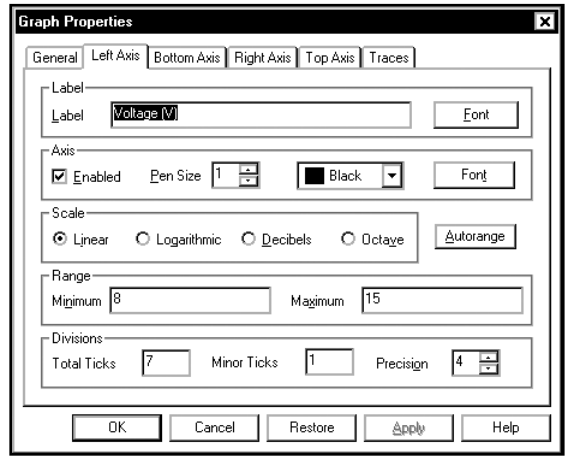
Выберем пункт **Properties**:



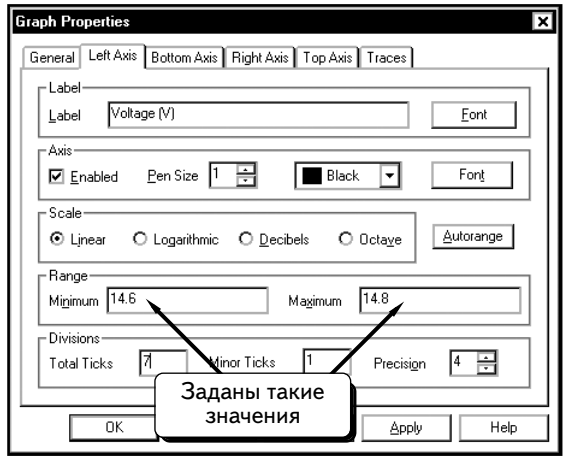


Это диалоговое окно позволяет изменять любые параметры нижнего графика. В данном примере достаточно изменить масштаб по оси y. Для этого щелкнем по вкладке **Left Axis** :

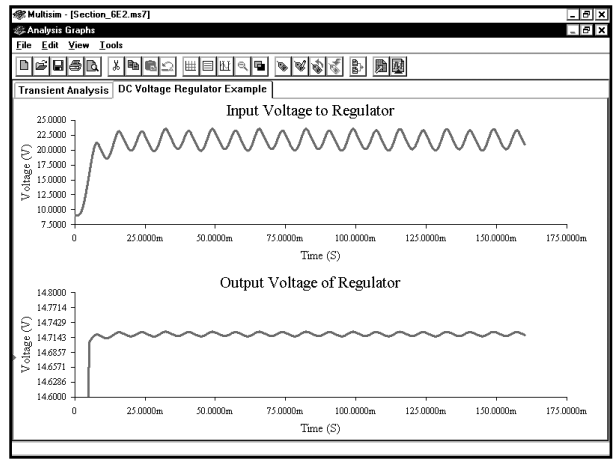




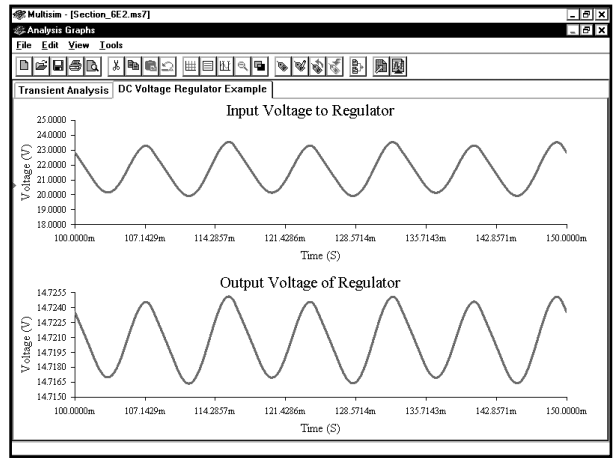
На основании результатов анализа схемы в виртуальной лаборатории известно, что среднее значение выходного напряжения равно 14,721 В (см. стр. 361), а размах пульсаций составляет 10 мВ (см. стр. 359). Благодаря этому можно определить диапазон для оси y, который позволит увидеть пульсацию. Если бы данные значения не были известны, пришлось бы воспользоваться методом проб и ошибок. Укажем для диапазона по оси y минимальное (14,6 В) и максимальное 14,8 В значения:



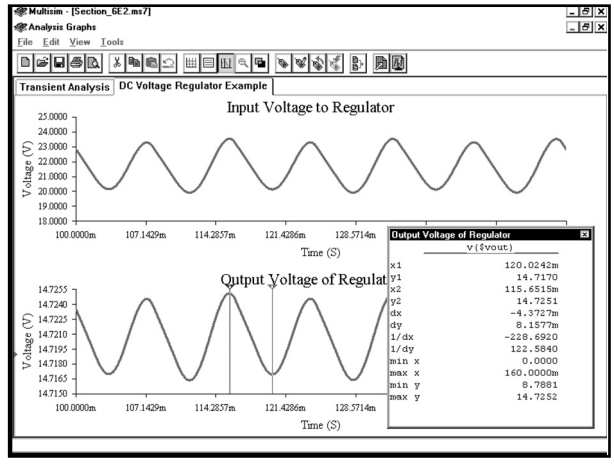
Нажмем кнопку **OK**, чтобы получить график:

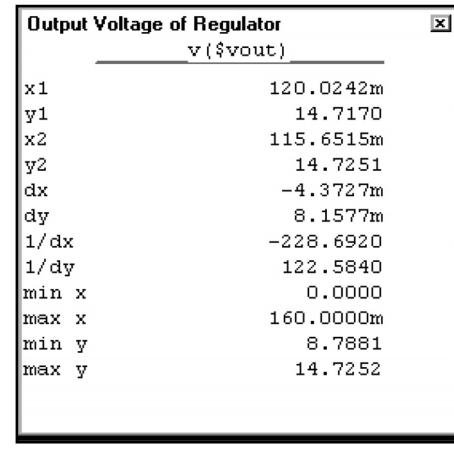


При желании можно увеличить масштаб. С помощью данной методики его можно изменять и по оси времени. Для этого щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по графику и выберем вкладку **Bottom Axis**. На графике изменен масштаб по оси времени для верхнего и нижнего графиков. Оси у двух графиков различаются, но по оси времени их масштаб совпадает:

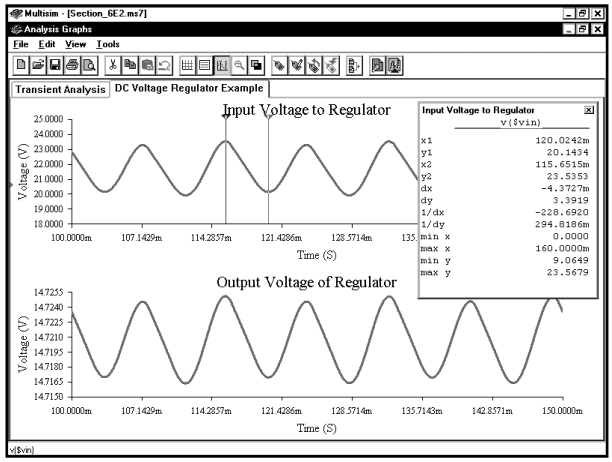


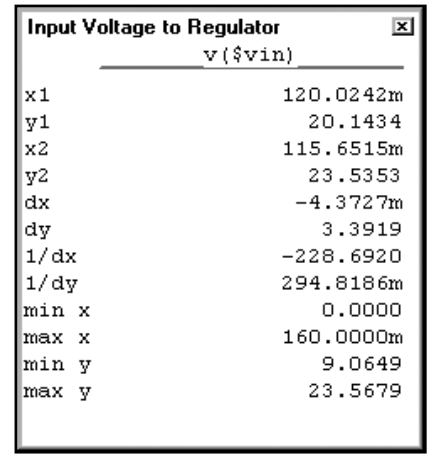
Воспользуем курсорами, чтобы получить числовые значения. Для этого щелкнем ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши по нижнему графику и выберем пункт **Toggle Cursors**. С помощью мыши поместим курсоры в пиковые точки осциллограмм:





По значению параметра **dy** мы определили, что размах пульсаций на выходе стабилизатора составляет **8,1577** мВ. Чтобы удалить курсоры из нижнего графика, щелкнем по нему правой кнопкой мыши и выберем пункт меню **Toggle Cursors**. Затем введем курсоры на верхнем графике: щелкнем по нему ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выберем пункт меню **Toggle Cursors**:





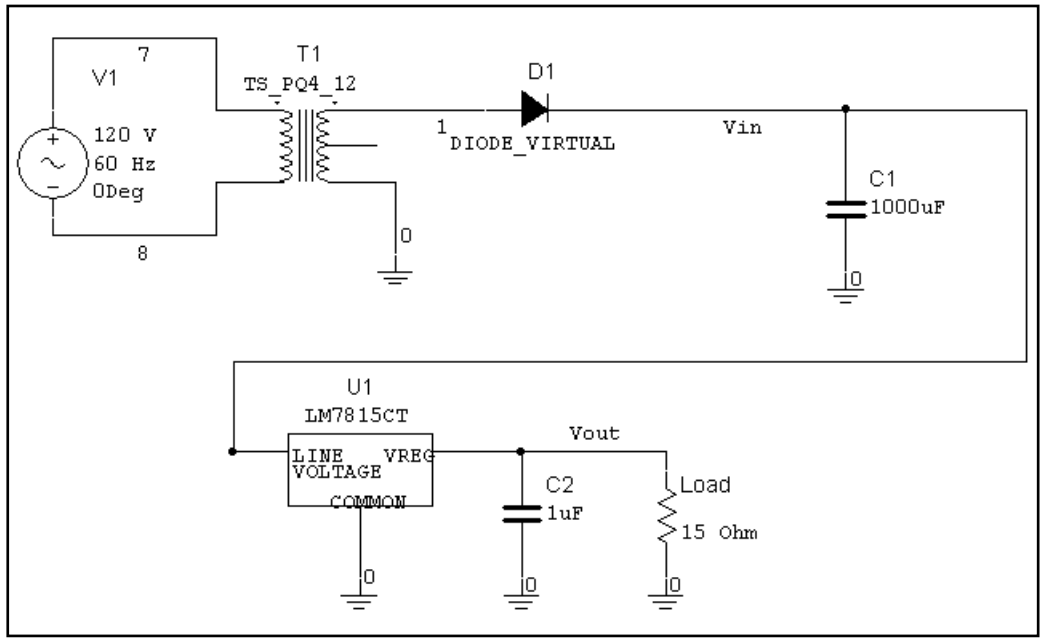
Значение параметра **dy** показывает, что размах пульсаций на входе стабилизатора равен **3,3919** В. Используя эти значения для расчета коэффициента сглаживания Ксгл, получим результат:

$$К_{сгл} = 20\log_{10}(\Delta Vin/\Delta Vo) = 20\log_{10}(3{,}3919\ В/8{,}1577\ мВ) = 52{,}19\ дБ.$$

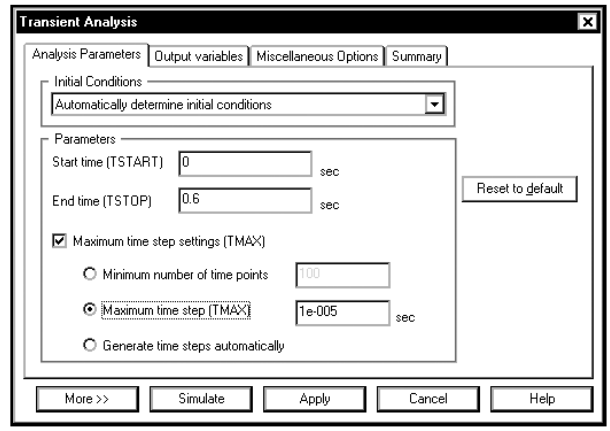
Это значение соответствует значению 52 дБ, полученному в результате виртуального моделирования.

УПРАЖНЕНИЕ 6-7: Используйте стабилизатор с однополупериодным выпрямителем вместо двухполупериодного, примените виртуальный диод, так как в библиотеке программы Multisim отсутствует промышленный диод, рассчитанный на необходимый ток. Остальные компоненты должны совпадать.

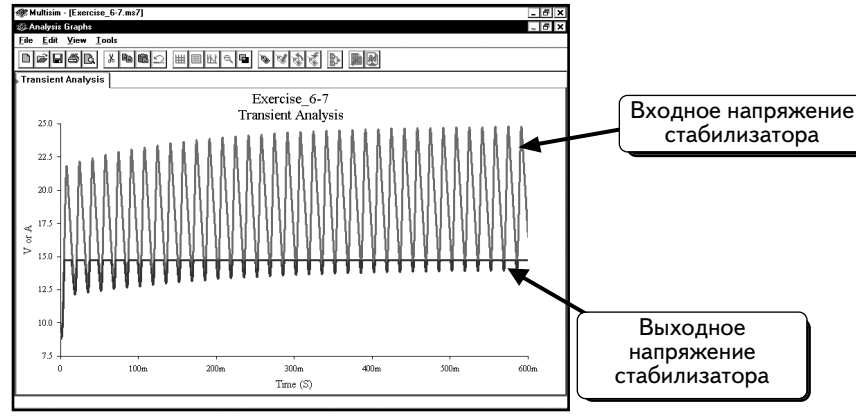
РЕШЕНИЕ:



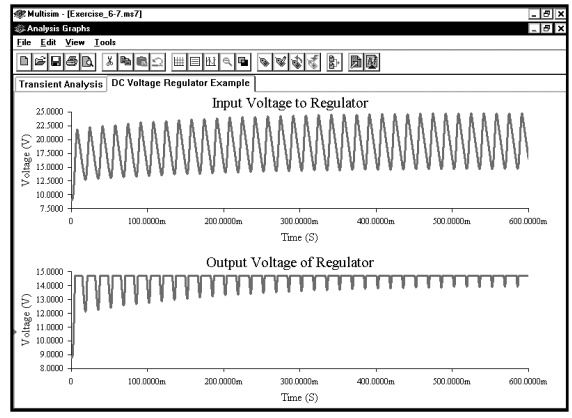
Настроим функцию **Transient Analysis.** Чтобы получить точные результаты, изменим максимальный промежуток по времени до 10 мкс. Кроме того, укажем время завершения, позволяющее получить несколько периодов пульсации; за это время конденсатор сможет зарядиться до напряжения, которого достаточно для корректной работы стабилизатора:



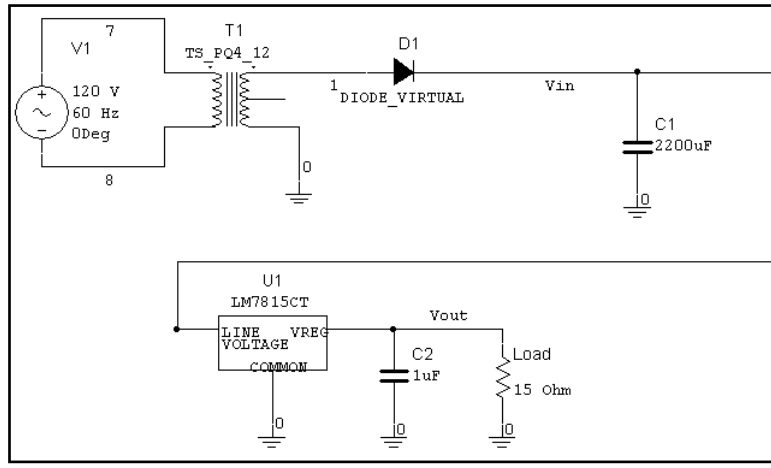
Результаты моделирования показаны ниже:



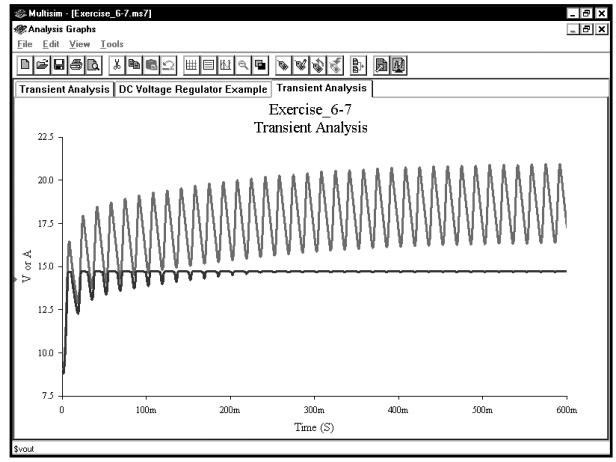
На этом рисунке довольно трудно различить кривые входного и выходного напряжений. Воспользуемся программой Postprocessor, чтобы отобразить кривые на отдельных графиках:



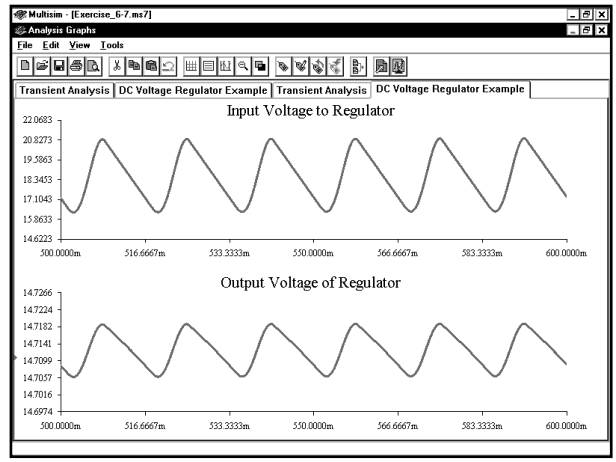
Выходное напряжение регулятора не устанавливается. Провалы выходного напряжения стабилизатора не исчезают, так как напряжение на входе слишком мало. Причина состоит в том, что для однополупериодного выпрямителя используется конденсатор слишком малой емкости. Чтобы решить проблему, выберем трансформатор с более высоким напряжением или увеличим емкость конденсатора. Стандартные конденсаторы имеют значения 1200, 1500, 1800 и 2200 мкФ. Выберем конденсатор на 2200 мкФ:



Функция **Transient Analysis** показывает, что теперь выходное напряжение регулятора равно 15 В. Тем не менее, при использовании минимального значения на входе выходное напряжение стабилизатора уменьшается несущественно :



Мы немного увеличим масштаб кривых, чтобы увидеть график выходного напряжения стабилизатора:



То, что сначала мы приняли за провалы напряжения стабилизатора, в действительности оказалось его нормальной выходной пульсацией. Сейчас регулятор функционирует нормально: большая пульсация на входе существенно снижается на выходе.

6.6. Схема ограничителя на стабилитроне. Исследование с помощью SPICE Transient Analysis

В этом разделе будет показано, как следует использовать зенеровский диод, а также источник с кусочно-линейным выходным напряжением (PWL). С помощью источника PWL создадим осциллограмму произвольного напряжения, которая формируется из прямых линий, соединяющих заданные точки. Создадим схему:

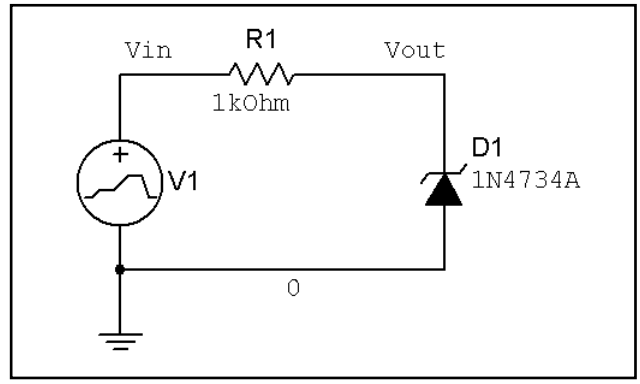
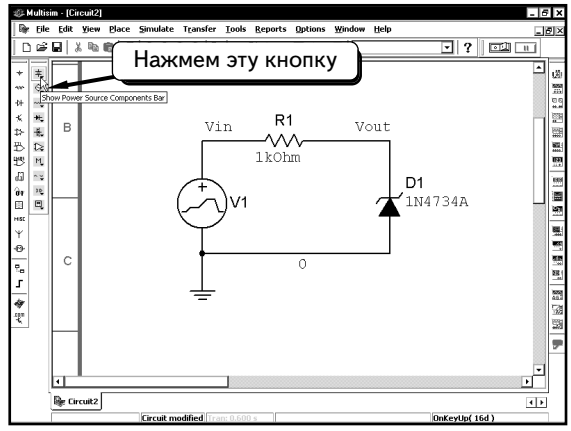
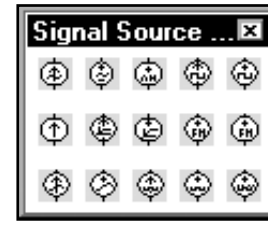
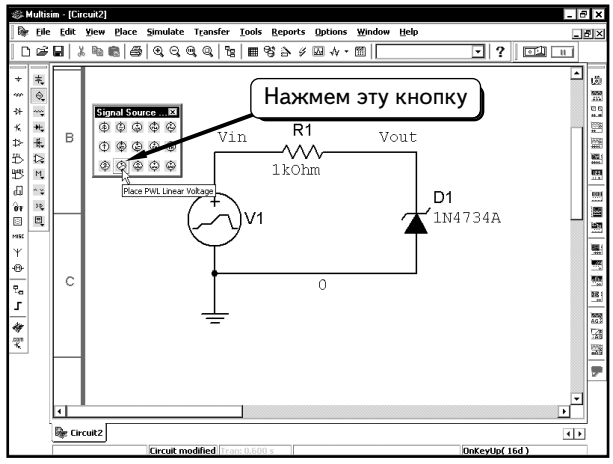


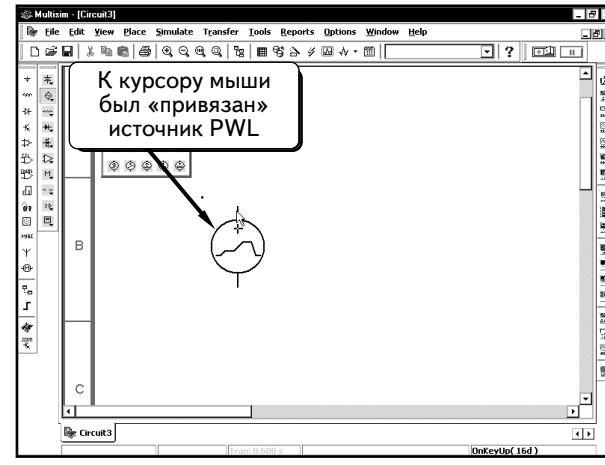
Схема содержит два новых компонента, источник напряжения PWL и зенеровский диод (стабилитрон). Покажем, как добавить эти компоненты. Сначала добавим источник напряжения PWL. Нажмем кнопку **Show Signal Source Components Bar** (**Показать панель компонентов Signal Source**) :





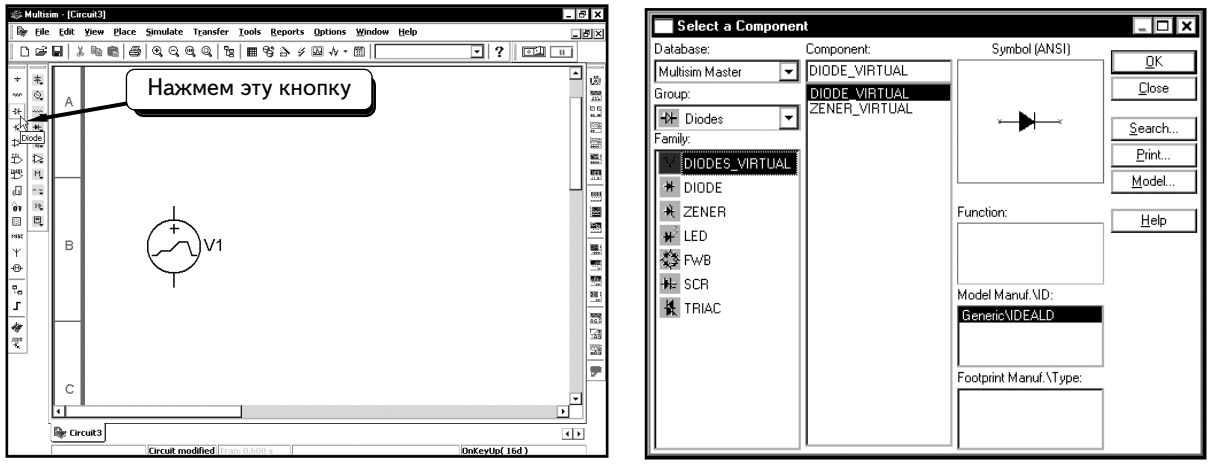
Щелкнем по кнопке **PIECEWISE_LINEAR_VOLTAGE_SOURCE** , источник напряжения будет «привязан» к курсору мыши:



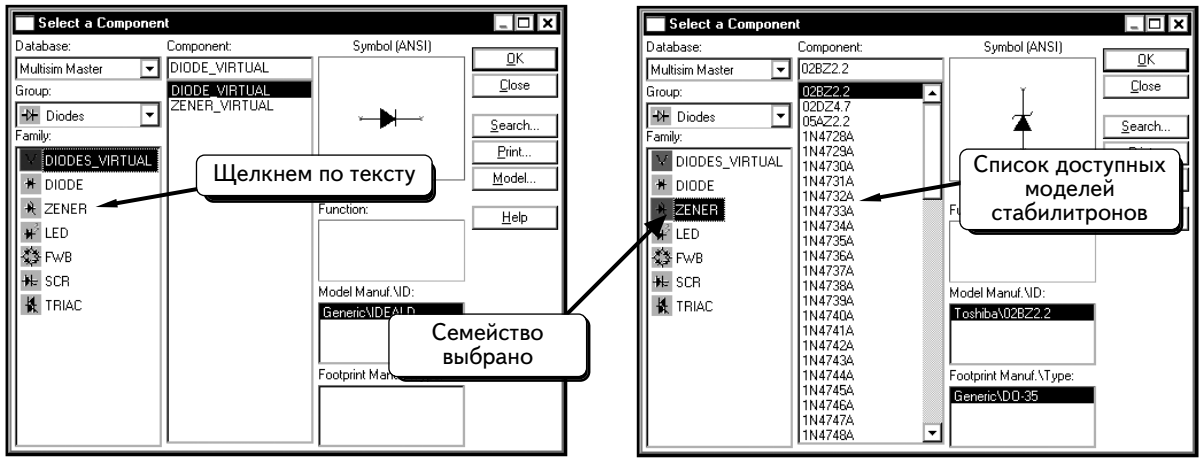


Теперь можно добавить в схему источник напряжения PWL.

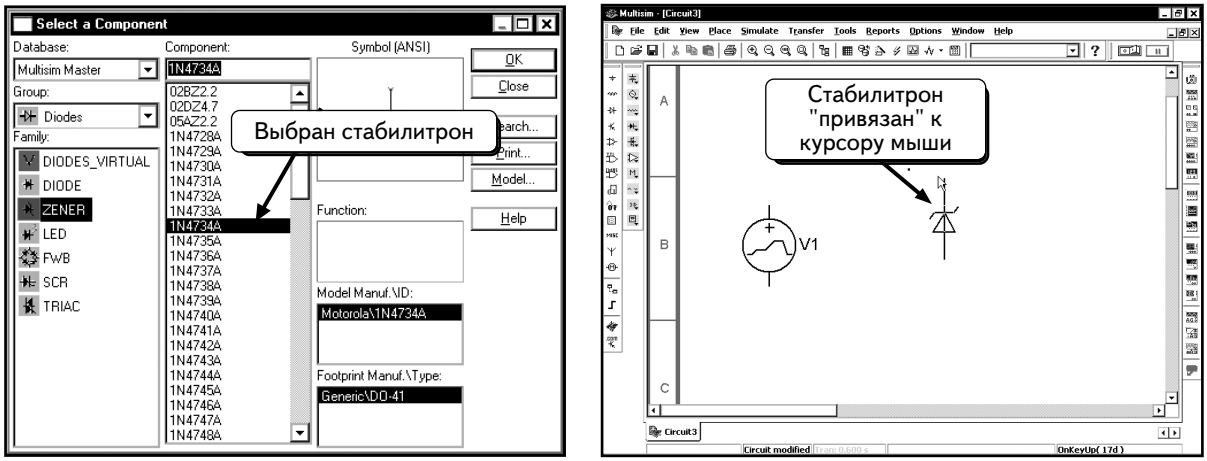
Чтобы добавить зенеровский диод, щелкнем по кнопке **Diode** :



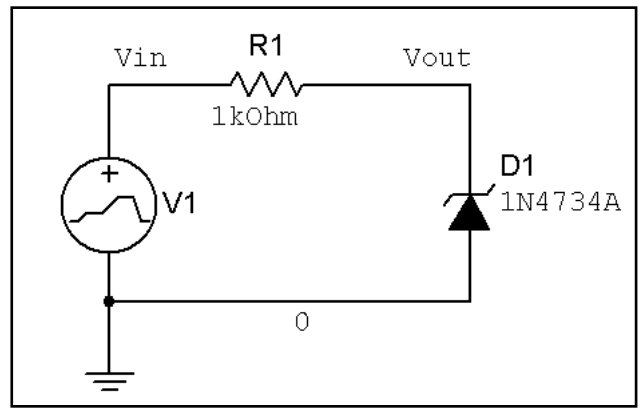
Щелкнем по опции **Zener** и выберем семейство:



В этом примере будем использовать зенеровский диод типа **1N4734A**. Выберем диод и нажмем кнопку **OK**. Диод будет «привязан» к курсору мыши:

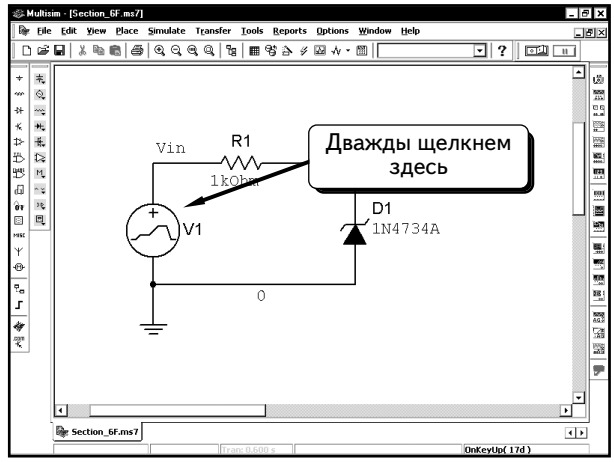


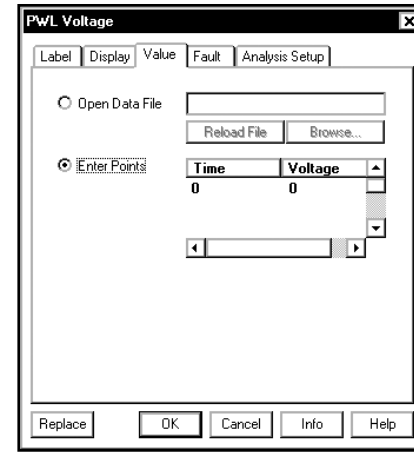
Теперь нужно добавить в схему зенеровский диод. Создадим схему:



Теперь нужно получить осциллограмму напряжения для источника PWL. Для этого необходимо рассчитать время и напряжение для отдельных точек осциллограммы, а затем соединить точки прямыми линиями. Такая осциллограмма удобна при работе с графиками, которые состоят из прямых линий, либо при необходимости сохранить данные осциллограммы в виде координат по времени и напряжению. Источник напряжения PWL можно настроить с использованием этих данных, а затем сформировать осциллограмму. В данном примере будем работать с источником PWL, чтобы создать один период напряжения, имеющего форму треугольника.

Чтобы настроить осциллограмму PWL, дважды щелкнем по иконке PWL:





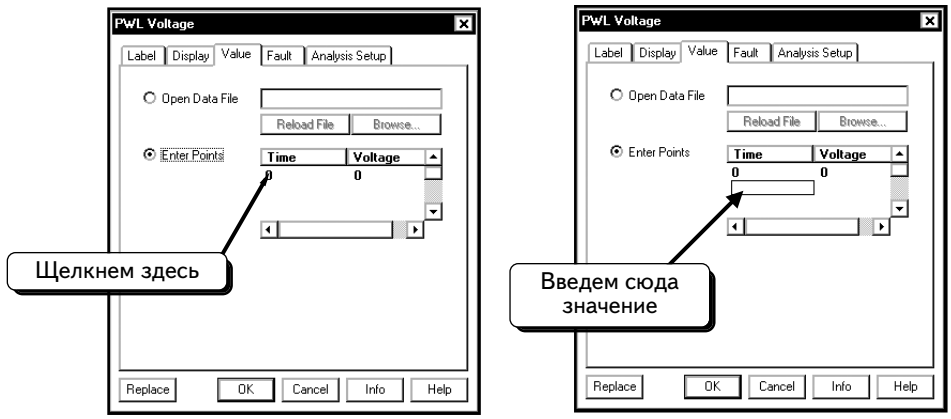
Чтобы создать источник напряжения, загрузим текстовый файл с точками либо введем точки вручную в диалоговом окне. Если использовать файл данных, это должен быть текстовый файл, каждая строка которого содержит одну точку. Значения в строке должны разделяться пробелом или табуляцией. Первое значение показывает время, а второе — напряжение, например:

```
0      0
0.001 15
0.003 -15
0.004 0
0.005 15
0.007 -15
0.008 0
0.009 15
0.011 -15
0.012 0
```

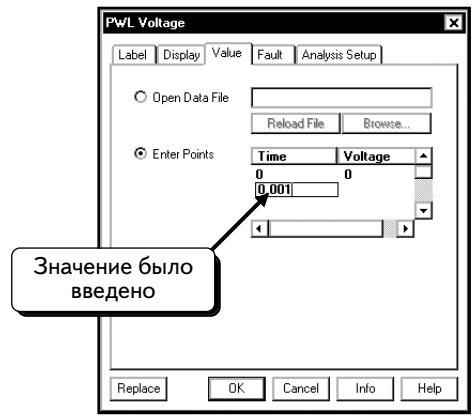
В этом примере значения разделены пробелами. Данные были созданы с использованием табуляции в программе Microsoft Excel и сохранены в текстовом файле. Это один из стандартных форматов Excel. Также можно создать файл в программе Windows Notepad и ввести данные вручную. Эти данные определяют следующие параметры осциллограммы напряжения: при времени в 0 с напряжение равно 0 В; при 0,001 с — 0, 15 В; при 0,003 с — –15 В; при 0,004 с — 0 В. Затем осциллограмма повторяется.

Кажется, что при использовании источника PWL у нас нет простого способа, позволяющего создать осциллограмму, которая повторяется. Чтобы сформировать большую повторяющуюся осциллограмму с источником PWL, придется создать таблицу точек в программе Excel, а затем сохранить файл в формате текста. Однако отметим, что в программе Excel легко можно ввести список точек для одного периода, а затем воспользоваться функцией, которая повторяет данные с определенной периодичностью. Здесь нет надобности говорить об этом.

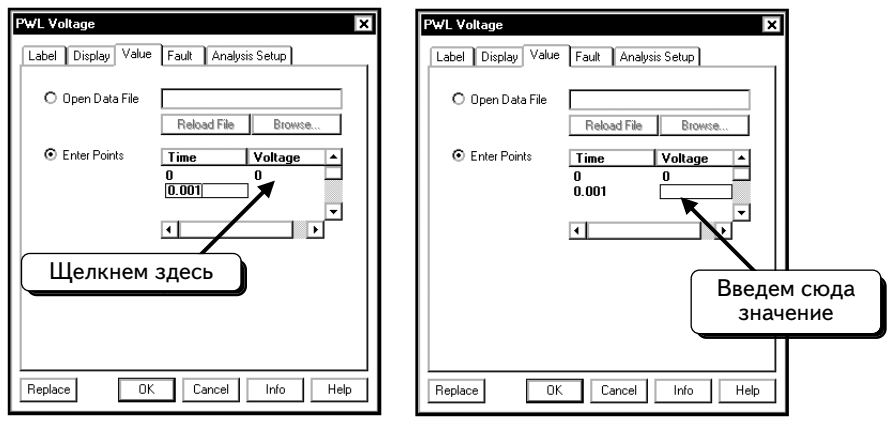
В нашем примере смоделируем схему для одного периода графика, имеющего форму треугольника. Для этого воспользуемся источником напряжения PWL. Введем данные вручную в диалоговом окне источника PWL. Первая точка по времени (время = 0, напряжение = 0) уже задана. Чтобы ввести вторую точку, нажмем кнопку :



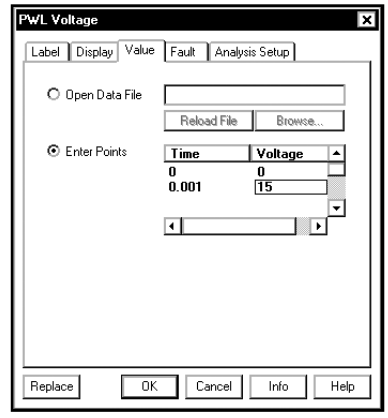
Появится пустая ячейка. Введем координату времени для второй точки. Не нажимайте клавишу **ENTER**:



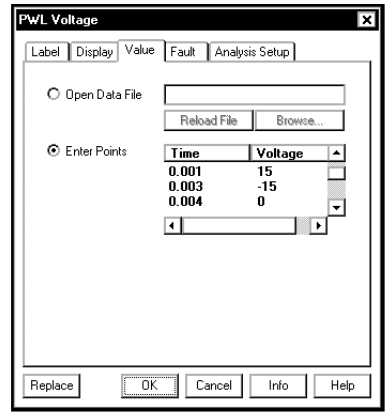
Далее введем координату напряжения. Щелкнем по кнопке:



Введем координату по напряжению для второй точки:



Добавим еще две точки: напряжение составляет –15 В при времени 0,003 с и 0 В при времени 0,004 с:



Введенные данные (табл. 6.1) определяют кривую, которая показана ниже:

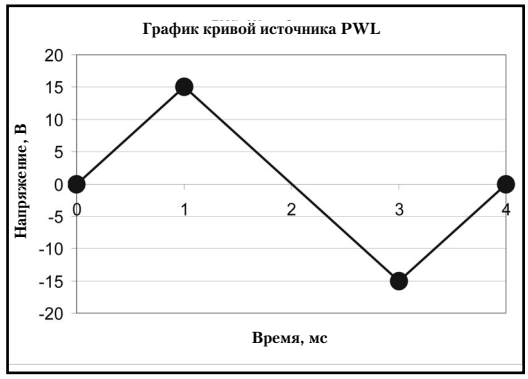
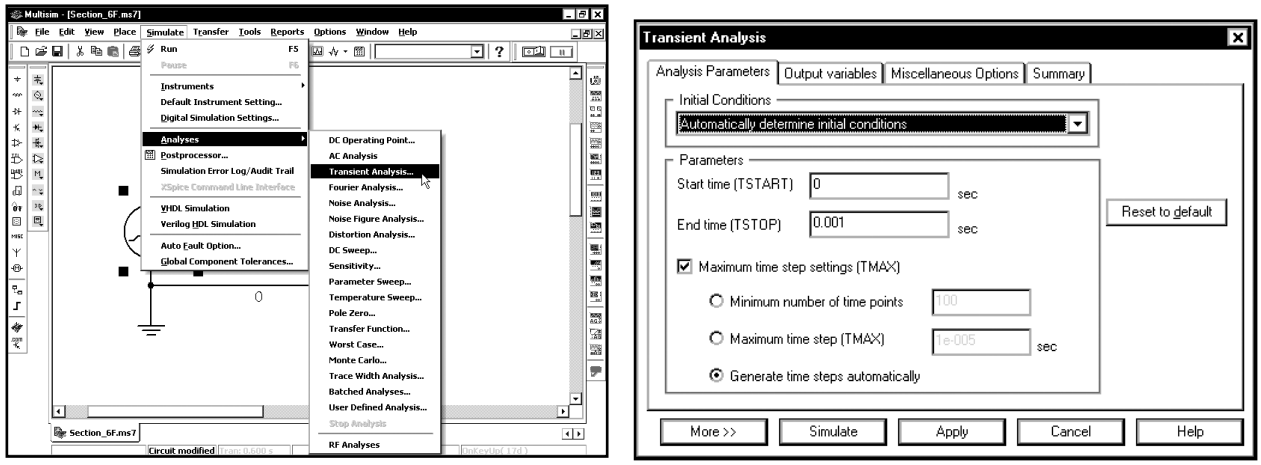


Таблица 6.1

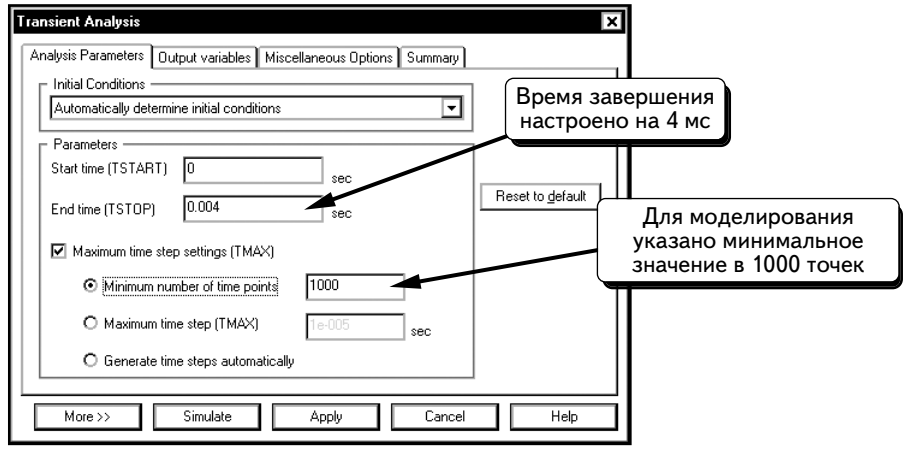
Время, с	0	0,001	0,003	0,004
Напряжение, В	0	15	–15	0

Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения для источника PWL.

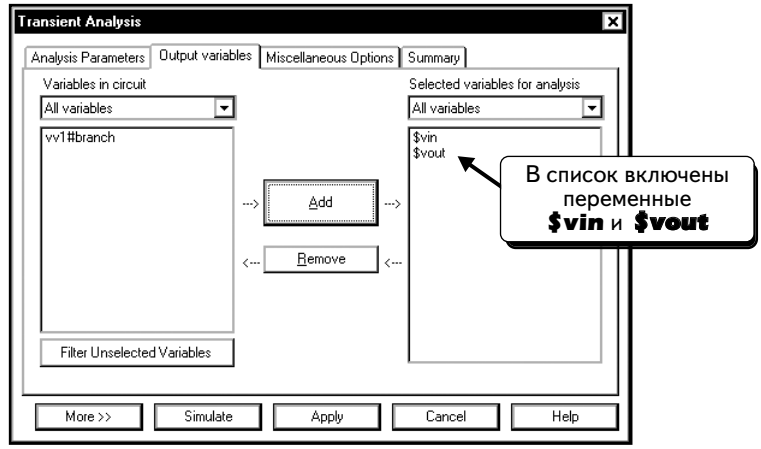
Выполним анализ Transient Analysis на интервале в 4 мс. Для этого выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis**:



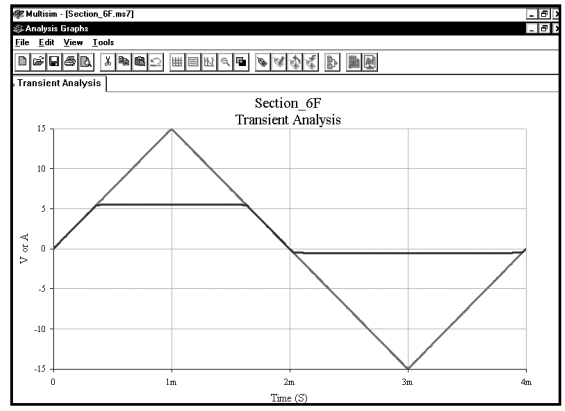
Необходимо, чтобы модель включала не менее 1000 точек моделирования. Введем данные, как показано:



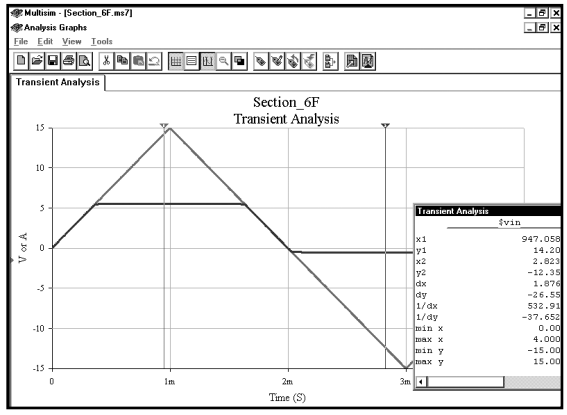
Далее укажем кривые, которые будут отображены. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменные **$vin** и **$vout**:



Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:



Чтобы добавить сетку, щелкнем по графику ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выберем пункт **Toggle Grid**. Если активировать курсоры (для чего надо щелкнуть ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выбрать пункт **Toggle Cursors**), можно измерить максимальное и минимальное значения для осциллограммы выходного напряжения :

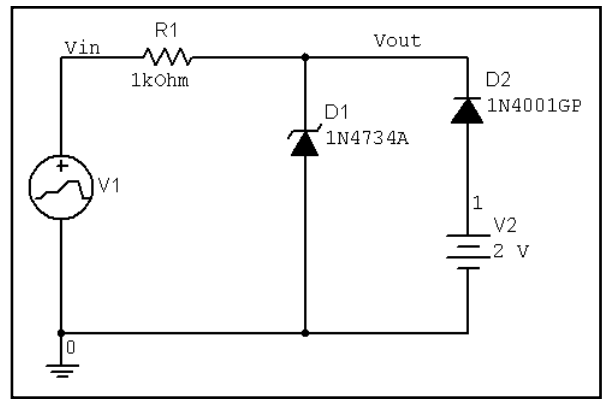


Transient Analysis

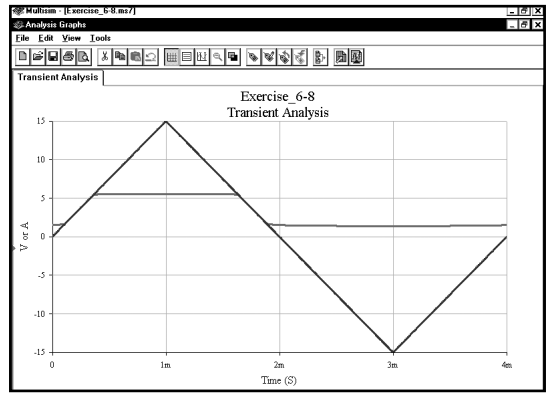
	$vin	$vout
x1	947.0588µ	947.0588µ
y1	14.2059	5.5571
x2	2.8235m	2.8235m
y2	-12.3529	-558.0036m
dx	1.8765m	1.8765m
dy	-26.5588	-6.1151
1/dx	532.9154	532.9154
1/dy	-37.6523m	-163.5299m
min x	0.0000	0.0000
max x	4.0000m	4.0000m
min y	-15.0000	-563.2337m
max y	15.0000	5.5594

Курсор 1 (красный) показывает, что выходное напряжение ограничено максимальным положительным значением **5,5594** В, курсор 2 (синий) — что выходное напряжение ограничено максимальным отрицательным значением (**–563** мВ).

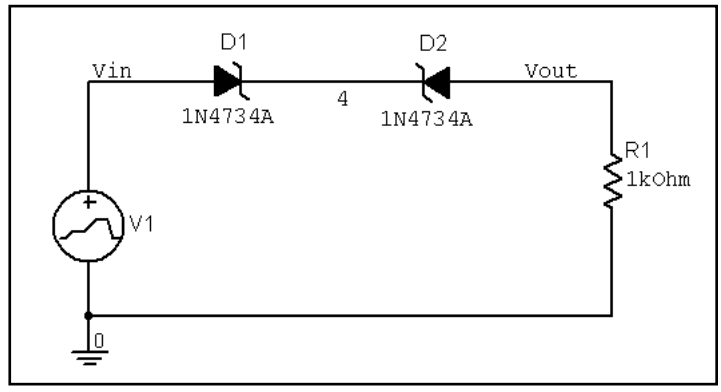
УПРАЖНЕНИЕ 6-8: С помощью функции **Transient Analysis** получите осциллограммы входного и выходного напряжений. На входе используйте напряжение 15 В в форме треугольника:



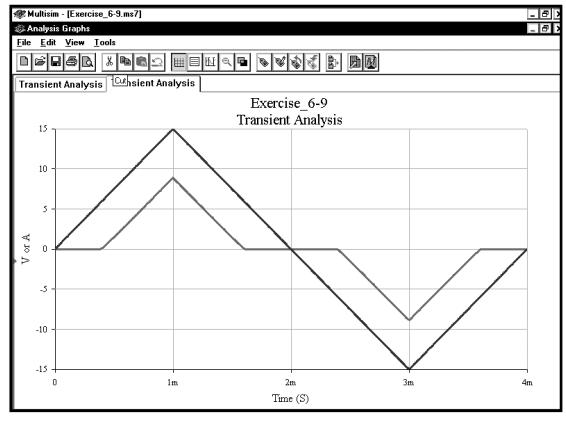
РЕШЕНИЕ:



УПРАЖНЕНИЕ 6-9: С помощью функции **Transient Analysis** получите осциллограммы входного и выходного напряжений в схеме ограничения «с мертвой зоной». На входе используйте напряжение ±15 В в форме треугольника:



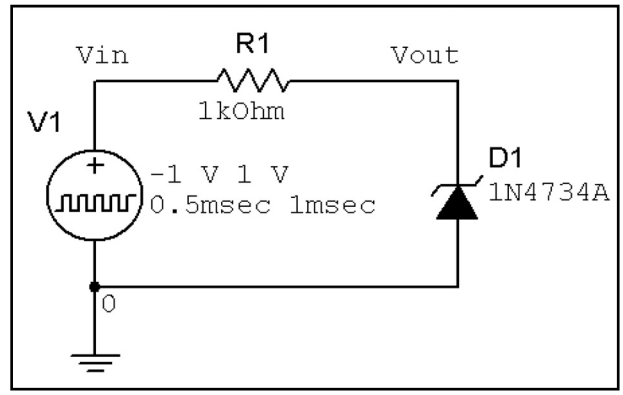
РЕШЕНИЕ:



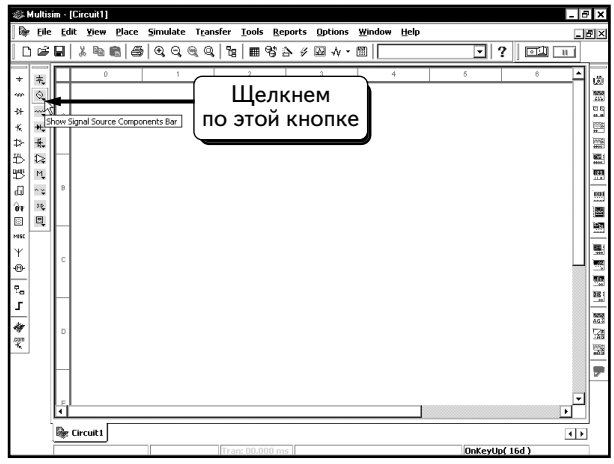
6.7. Схема ограничителя на стабилитроне. Моделирование в виртуальной лаборатории

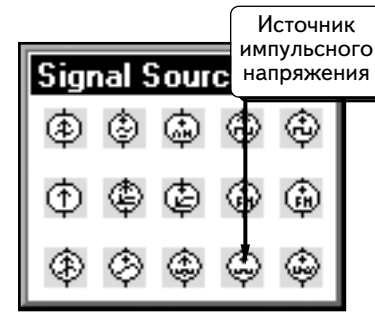
В этом разделе выполним такое же моделирование, как и в разделе 6.6, но будем использовать источник напряжения для формирования кривой, а также осциллограф для отображения осциллограмм.

Создадим показанную ниже схему:

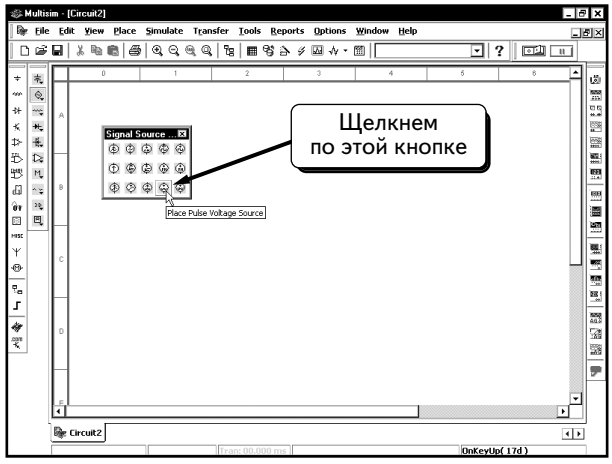


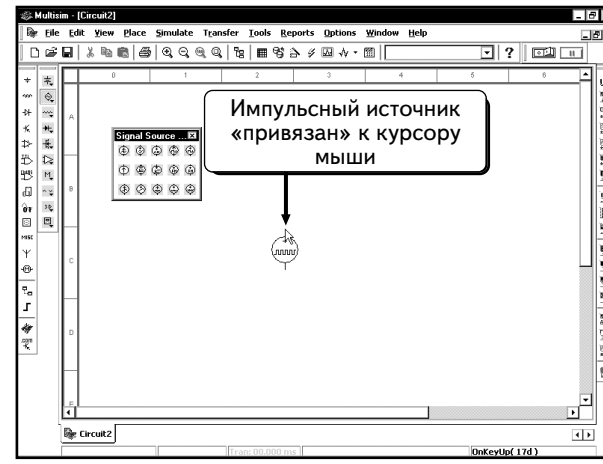
Эта схема содержит источник импульсного напряжения, с которым мы пока не работали. Покажем, как добавить его в схему и настроить параметры. Щелкнем по кнопке ***Show Signal Source Components Bar*** :



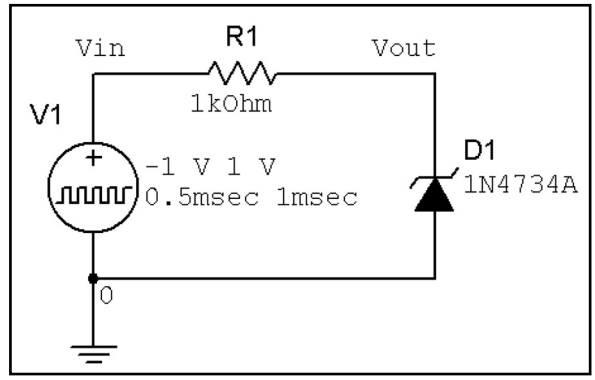


Щелкнем по кнопке ***PULSE_VOLTAGE_SOURCE*** . Источник напряжения будет «привязан» к курсору мыши:

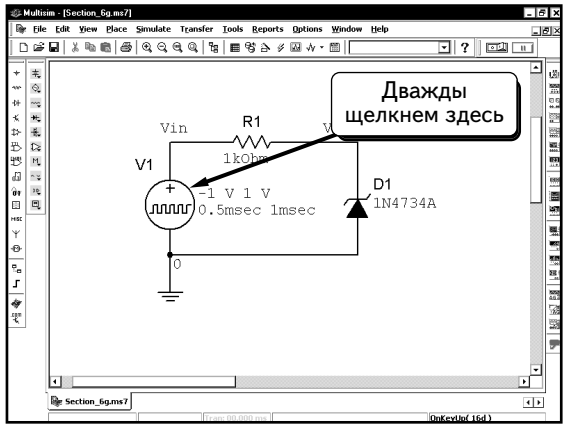


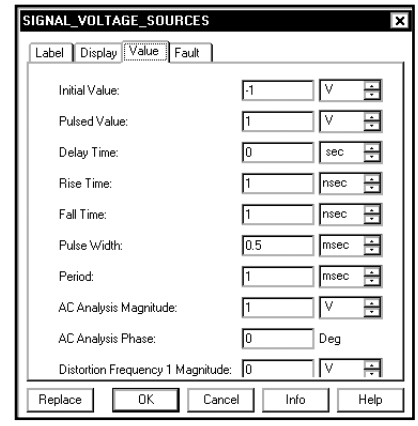


Теперь добавим источник напряжения в схему. Создадим схему:



Далее настроим параметры источника напряжения. Дважды щелкнем по иконке источника:



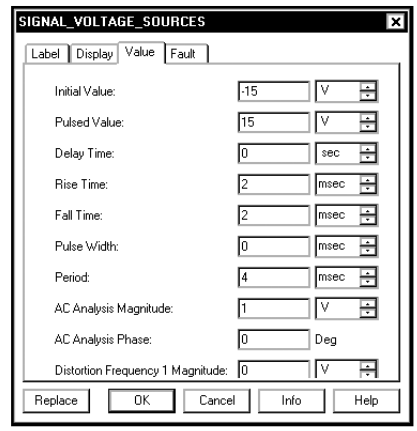


Параметр ***Initial Value*** **(Начальное значение)** определяет уровень напряжения до импульса, а также уровень напряжения после импульса, параметр ***Pulsed Value*** **(Значение импульса)** — уровень напряжения во время формирования вершины импульса, параметр ***Pulse Width*** **(Ширина импульса)** — в течение какого времени напряжение должно соответствовать вершине импульса, параметр ***Period*** **(Период)** — период колебания, то есть время, через которое осциллограмма повторяется, параметр ***Rise Time*** **(Время нарастания)** — сколько времени необходимо импульсу, чтобы перейти из начального значения к значению импульса, параметр ***Fall Time*** **(Время спада)** указывает, сколько времени необходимо импульсу, чтобы перейти от значения, соответствующего вершине импульса, к начальному значению.

В начале моделирования напряжение находится на уровне начального значения. Затем напряжение начинает повышаться до напряжения вершины. Когда проходит время нарастания, напряжение стабилизируется на значении вершины в течение времени, которое равно ширине импульса. В нашем случае в начале моделирования напряжение сразу начинает повышаться. Если нужно задержать импульс в начале моделирования, используем опцию ***Delay Time*** **(Время задержки)**. Эта опция определяет промежуток времени между началом моделирования и первым импульсом. По умолчанию данный параметр равен нулю, то есть импульс начинается сразу при запуске моделирования.

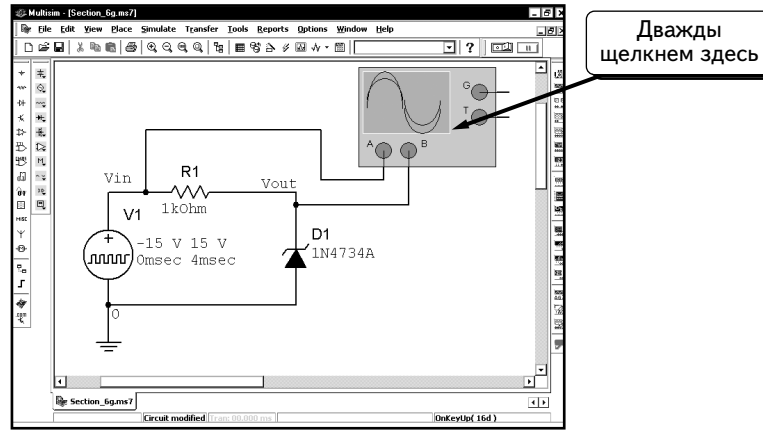
Воспользуемся функцией **Transient Analysis**. Параметры ***AC Analysis Magnitude*** **(Амплитуда анализа переменного тока)**, ***AC Analysis Phase*** **(Фаза анализа переменного тока)** и ***Distortion Frequency*** 1 ***Magnitude*** **(Амплитуда частоты искажения 1)** используются при анализе переменного тока и искажений; функция **Transient Analysis** их игнорирует. Не будем вводить значения для этих опций.

Создадим график в виде треугольника, который проходит от –15 до 15 В и имеет период 4 мс. Переход от –15 до 15 В занимает 2 мс, поэтому для параметра ***Rise Time*** введем значение 2 мс. Переход от 15 до –15 В занимает тоже 2 мс, поэтому для параметра **Fall Time** введем значение 2 мс. Настроим значение параметра ***Pulse Width*** на 0, так как при достижении точки 15 В напряжение сразу же меняет направление и возвращается в точку –15 В. Если выбрать для параметра ***Pulse Width*** другое значение, то при достижении точки 15 В напряжение будет стабилизировано в течение времени, определенного параметром ***Pulse Width***. В результате будет создана линия на уровне 15 В, которая нам не нужна. В диалоговом окне показаны настройки графика 15 В с периодом 4 мс:

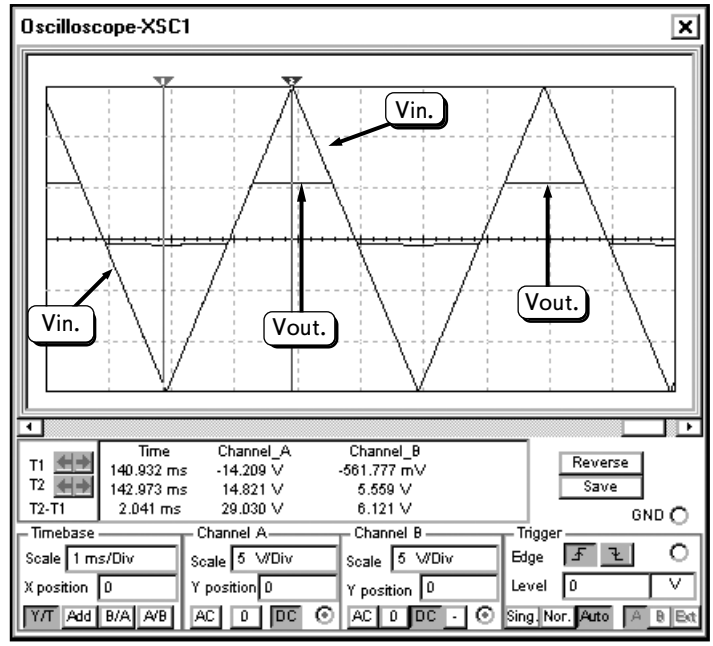


Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения.

Выполним виртуальное моделирование и отобразим результаты на экране осциллографа. Добавим в схему осциллограф, как показано ниже:



Выполним моделирование. Затем дважды щелкнем по осциллографу, чтобы просмотреть результаты:

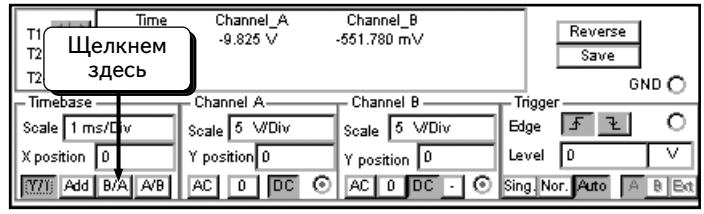


Курсоры показывают, что максимальное положительное значение параметра **Vout** составляет **5,559** В, а максимальное отрицательное равно **–561,7** мВ. Данные результаты соответствуют значениям, которые были получены с помощью функции **Transient Analysis** (см. стр. 384).

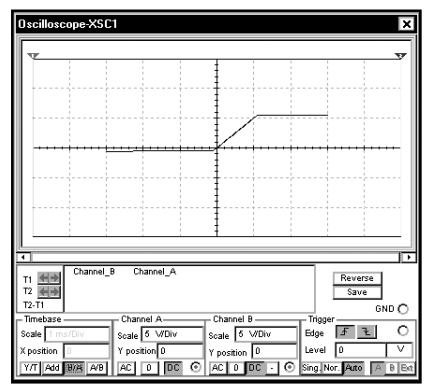
6.7.1. Получение передаточных характеристик

Если вы работаете со схемой ограничения (как в предыдущем примере), может понадобиться передаточная характеристика. Это — кривая, которая показывает зависимость выходного значения напряжения в схеме от входного. В лабораторных условиях можно легко решить данную задачу с помощью функции X-Y осциллографа. В обычном режиме осциллограф отображает каналы **A** и **B** относительно времени. При переключении осциллографа в режим X-Y он отобразит канал **A** относительно канала **B** или канал **B** относительно канала **A** (в зависимости от настройки). Осциллограф Multisim может показывать как зависимость сигнала на канале **A** от сигнала на канале **B**, так и сигнал канала **B** в зависимости от сигнала канала **A**.

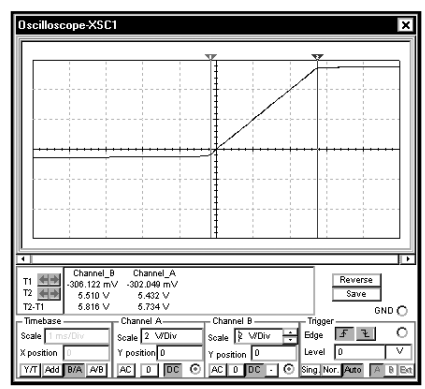
При использовании передаточных характеристик, как правило, показывают зависимости выходного напряжения от входного. В данной схеме сигнал **Vin** подаем на канал **A**, а сигнал **Vout** — на канал **B**. Отобразим сигнал **Vout** по оси y, а параметр **Vin** — по оси x. Нажав кнопку **B/A**, можно просмотреть график на осциллографе:



Передаточная характеристика имеет вид:

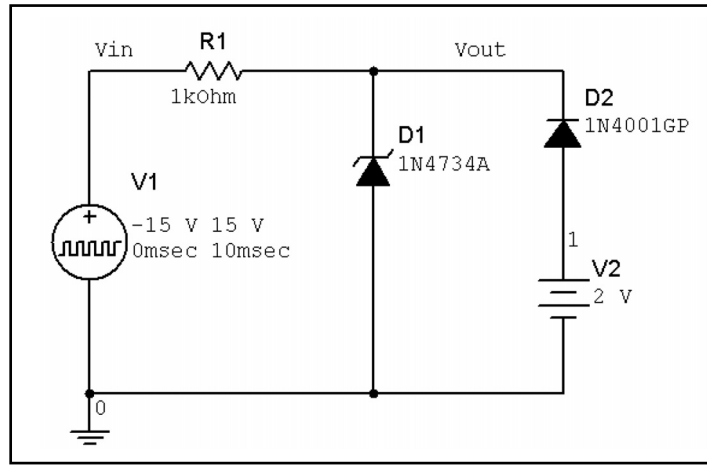


Чтобы увеличить переходную характеристику, можно изменить масштабы по осям. Настройка канала **A** изменяет масштаб по оси x, а канала **B** — по оси y. Воспользуемся курсорами, чтобы измерить контрольные точки переходной характеристики:

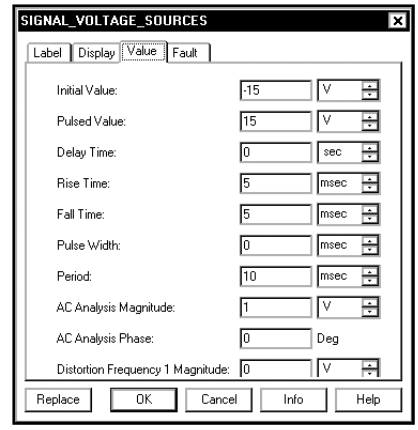


Чтобы вернуться в стандартный режим отображения осциллограмм относительно времени, нажмем кнопку **Y/T**. Обратите внимание: если нажать кнопку **A/B**, на графике будет отображен канал **A** относительно канала **B**. Покажем канал **A** (или **Vin**) на оси y, а канал **B** (или **Vout**) — на оси x. В результате получим график с параметрами **Vin** и **Vout**, а не переходную характеристику.

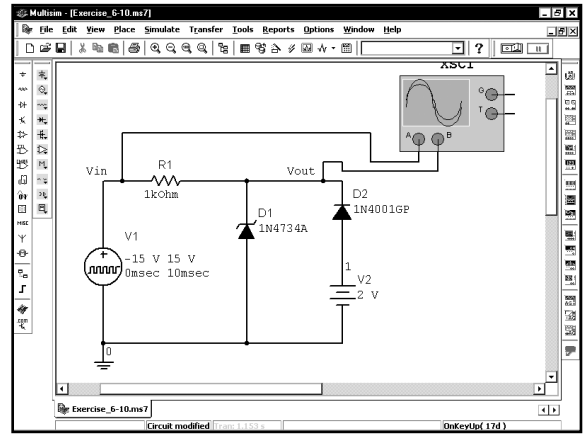
УПРАЖНЕНИЕ 6-10: Получите на осциллографе осциллограмму выходного напряжения и переходную характеристику. Для входного напряжения используйте осциллограмму ±15 В с частотой 100 Гц. Используйте источник импульсного напряжения:



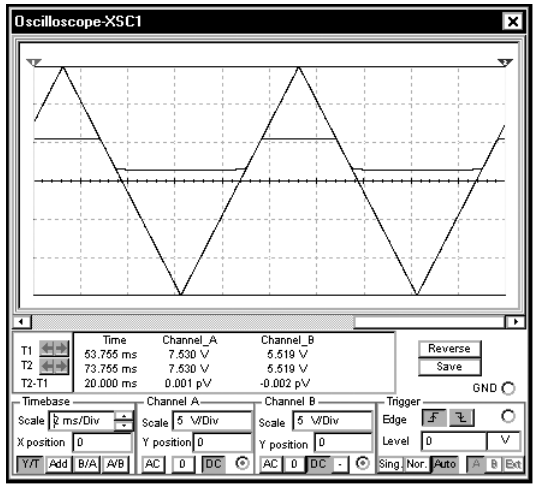
РЕШЕНИЕ: Атрибуты источника импульса напряжения показаны ниже:

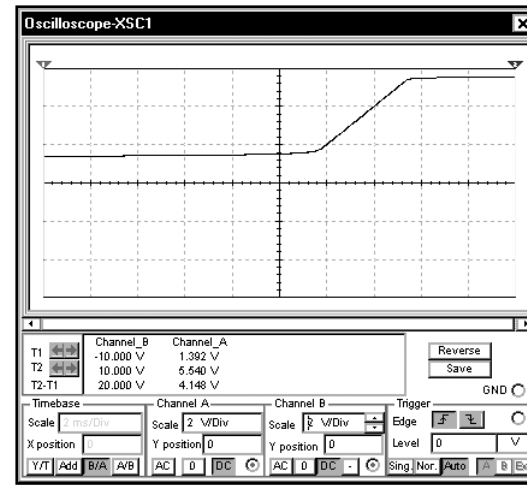


Подключите к схеме осциллограф:

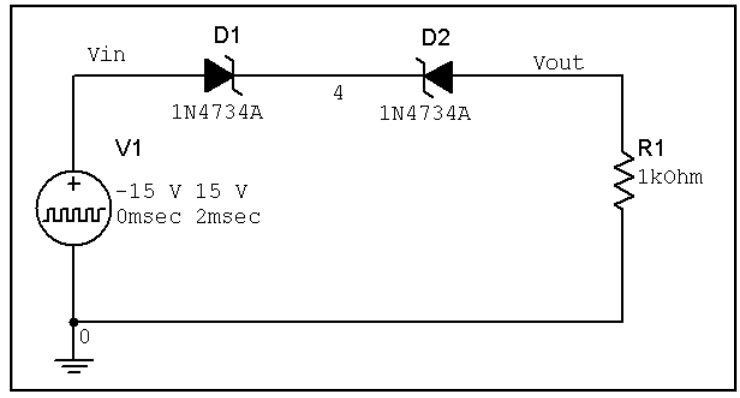


Осциллограммы и кривая переходных характеристик приведены ниже:

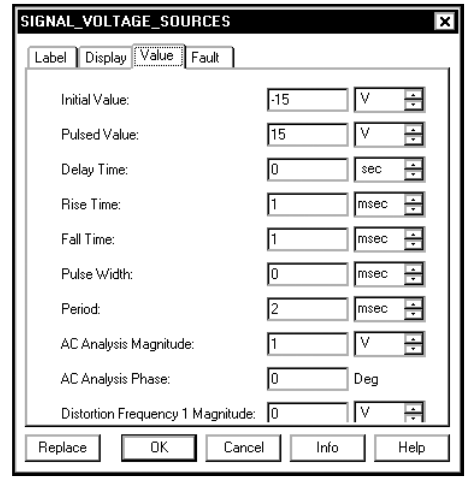




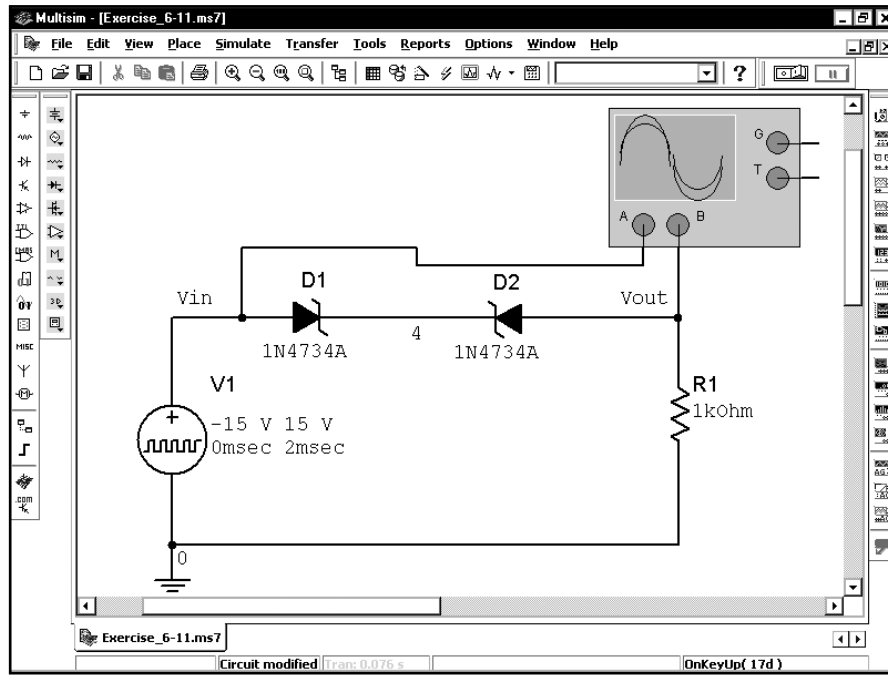
УПРАЖНЕНИЕ 6-11: Создайте осциллограмму выходного напряжения и переходную характеристику для схемы с ограничением. Для входного напряжения используйте осциллограмму ±15 В с частотой 500 Гц. Используйте источник импульсного напряжения:



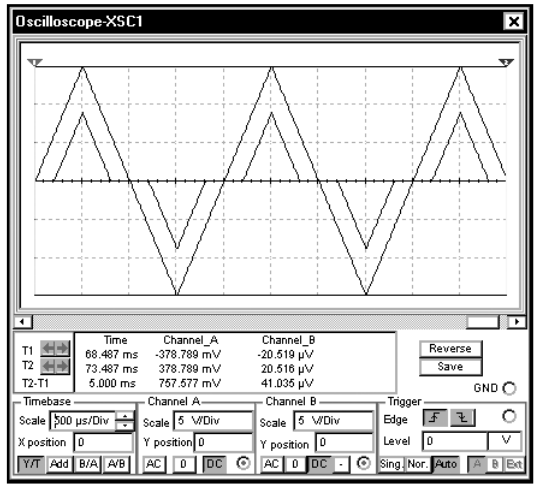
РЕШЕНИЕ: Атрибуты источника импульса напряжения показаны ниже:

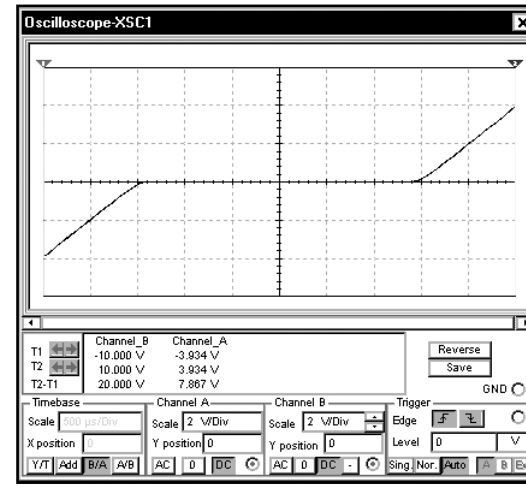


Подключите к схеме осциллограф:



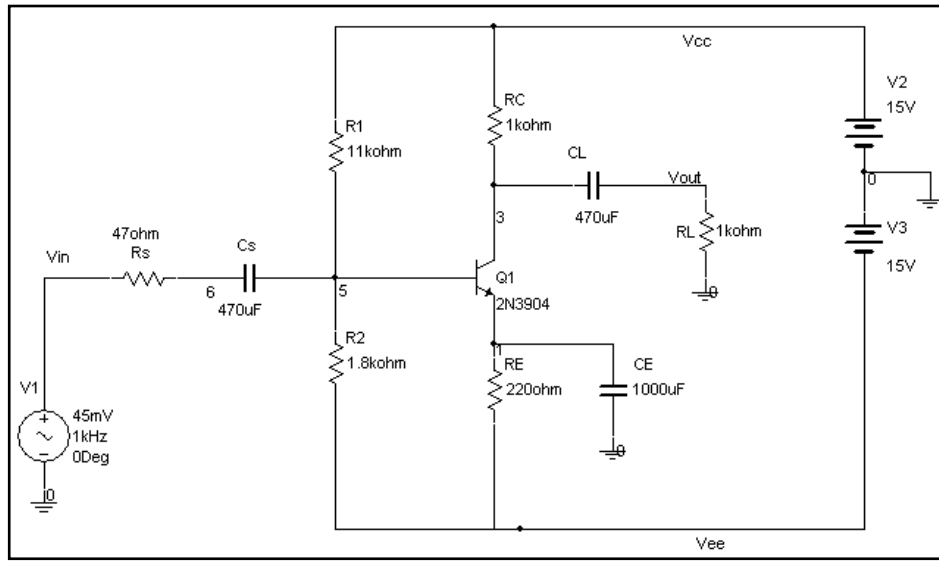
Осциллограммы и кривая перехода показаны ниже:





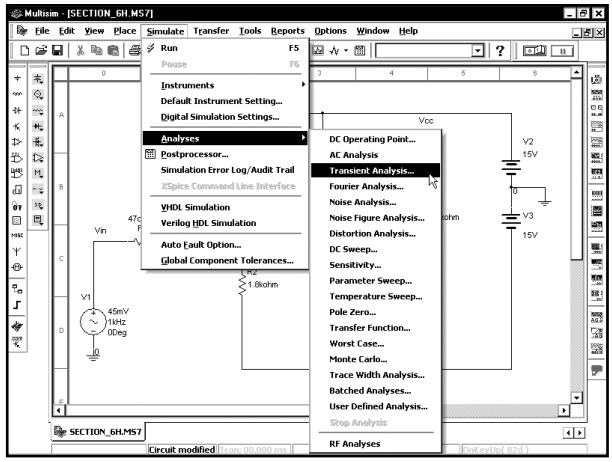
6.8. Размах напряжения на транзисторе

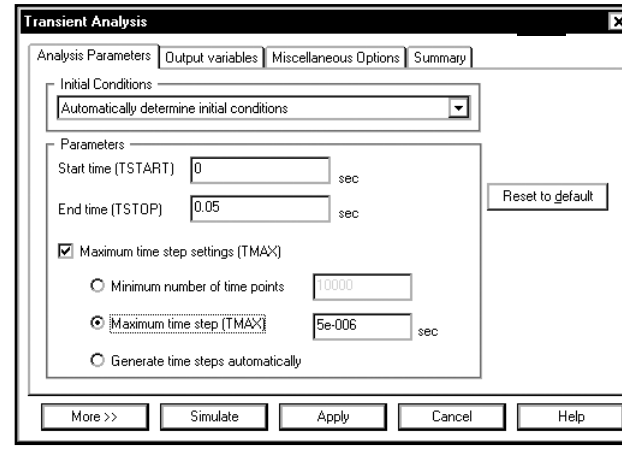
В данном разделе получим осциллограммы выходного напряжения транзисторного усилителя, с которым работали в разделе 5.3. Ранее было определено, что усиление транзистора составляет 45,7 дБ, что соответствует значению 193. Также известно, что полоса пропускания усилителя лежит в диапазоне от 65 Гц до 6,2 МГц. Для того чтобы получить осциллограмму выходного напряжения усилителя в центре полосы пропускания, используем схему, показанную в разделе 5.3; создадим ее:



Источник напряжения имеет амплитуду 45 мВ и частоту 1 кГц, следовательно, $V_1 = 0{,}045\sin(2\pi*1000t)$. Выбрано такое значение амплитуды, чтобы размах напряжения транзистора был наибольшим. Возможно, придется выполнять моделирование несколько раз для различных значений амплитуды ***Vin***, чтобы определить амплитуду, при которой размах напряжения имеет максимальное значение. Если амплитуда слишком мала, размах напряжения будет невелик. Если амплитуда слишком велика, транзистор перейдет в состояние насыщения и отсечки. Должно быть выбрано такое значение амплитуды, чтобы транзистор не переходил в состояние насыщения или отсечки.

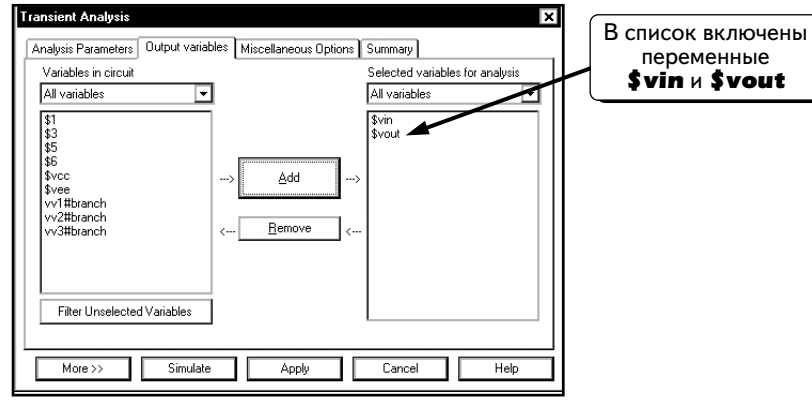
Теперь настроим функцию **Transient Analysis**. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis** и настройки, приведенные ниже:



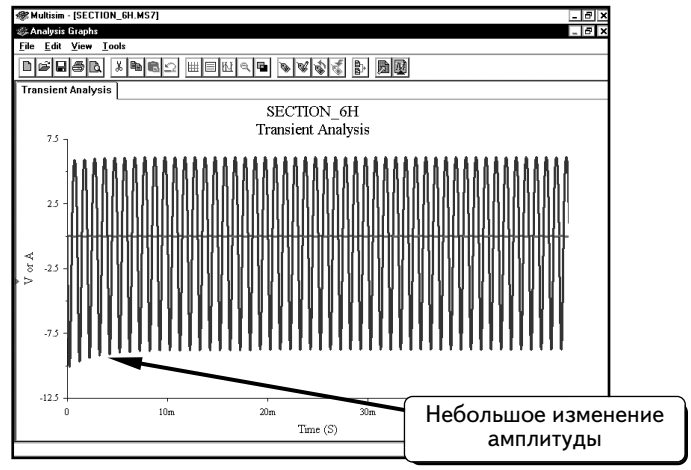


Обратите внимание: Моделирование выполнено для значения 50 мс (параметр ***End Time*** равен ***0,05*** с). Так как источник имеет частоту 1 кГц, моделируем 50 периодов колебаний для усилителя, что позволит усилителю перейти в установившийся режим. Если посмотреть на кривую выходного напряжения транзистора в начале моделирования, то видно, что график немного колеблется, потому что конденсаторы заряжаются до среднего значения выходного напряжения. Так как нас интересуют процессы в установившемся режиме, моделирование выполняем в течение 50 мс и используем результаты, полученные в конце моделирования. Настроим также параметр ***Maximum time step* (Максимальный промежуток времени)** на 5 мкс, чтобы получить точные результаты. Если не задать это значение, программа Multisim может использовать слишком большой промежуток времени, и осциллограмма будет выглядеть слишком угловатой. При частоте в 1 кГц период составляет 1 мс или 1000 мкс. Если параметр ***Maximum time step*** равен 5 мкс, каждый период осциллограммы будет включать не менее 200 точек моделирования. В результате осциллограмма будет плавной, но время выполнения моделирования при этом увеличится.

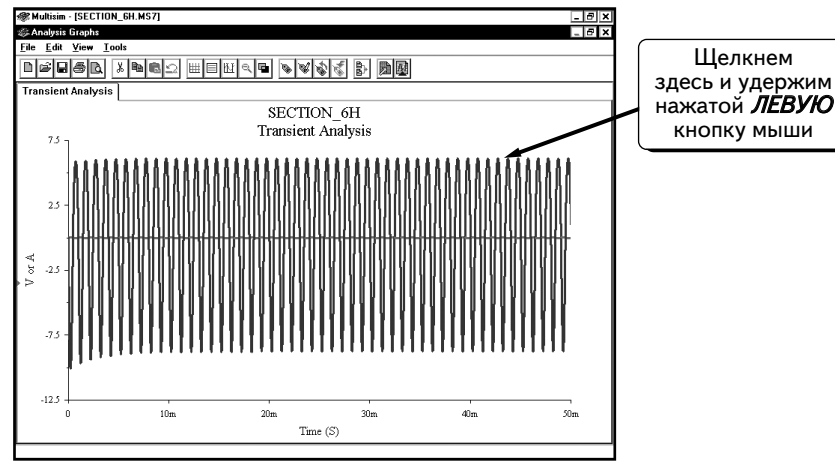
Щелкнем по вкладке **Output variables** в диалоговом окне и выделим переменные **$vin** и **$vout**:



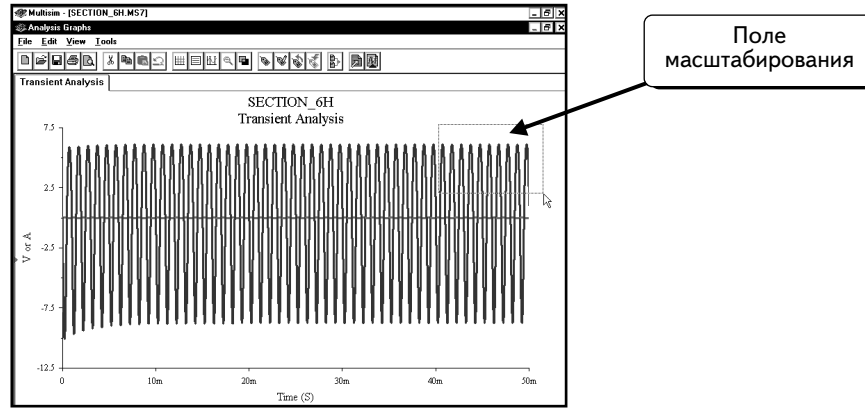
Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:



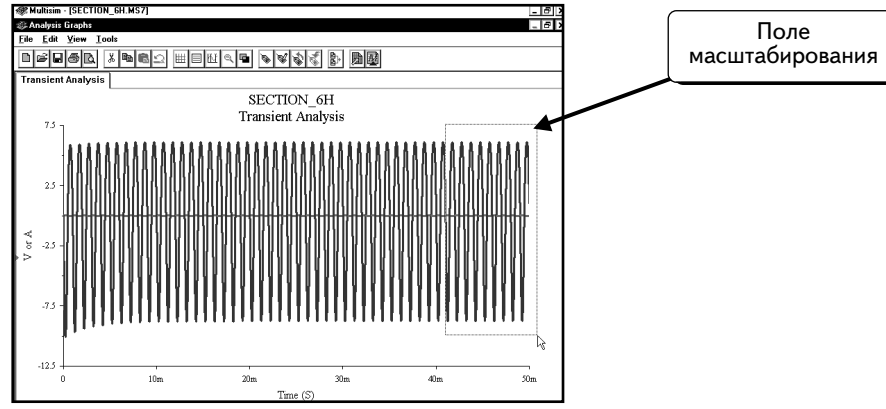
Виден небольшой спад минимумов выходного напряжения. Минимальное значение на каждом периоде немного повышается в течение первых 10 мс, а потом стабилизируется. Увеличим масштаб осциллограмм. Для этого щелкнем по левому верхнему углу области для увеличения и удержим кнопку мыши:



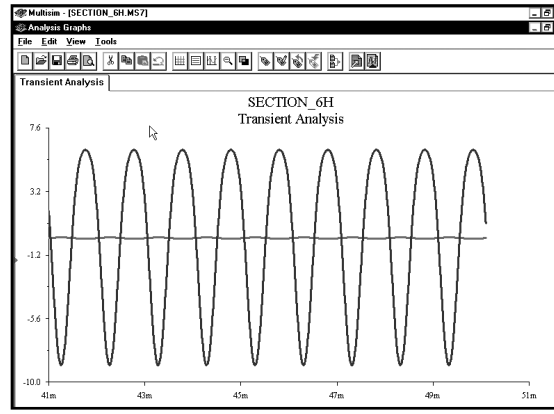
Продолжая удерживать нажатой кнопку мыши, переместим курсор вниз и вправо. Появится окно масштабирования:



Переместим курсор мыши таким образом, чтобы окно масштабирования включало необходимую часть осциллограммы :



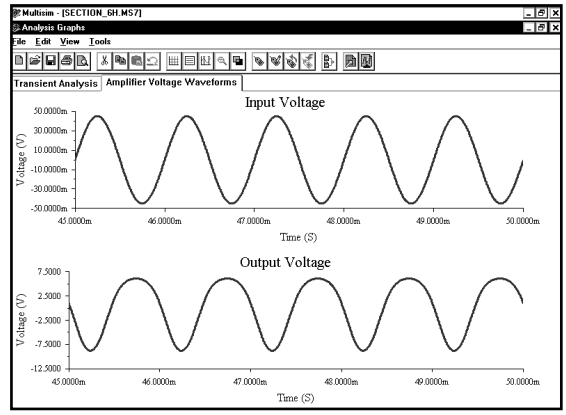
Когда кнопка мыши будет отпущена, программа Multisim увеличит масштаб в поле:



Выходное напряжение настолько больше входного, что с трудом можно различить какое-либо изменение на входе. Видно, что осциллограмма выходного напряжения напоминает синусоиду, но выглядит округлой вверху и заостренной внизу. Следовательно, кривая выходного напряжения искажена и не является чистой синусоидой. Искажение свидетельствует о том, что выходное напряжение транзистора содержит частоты, которые отсутствуют во входном сигнале. При отсутствии искажений в усилителе на входной частоте 1 кГц на выходе появится только

частота 1 кГц. Выходной сигнал усилителя отличается от входного сигнала, поэтому он содержит другие частоты. Степень искажения выходного напряжения будет показана в следующем разделе с помощью гармонического анализа **Fourier Analysis (Анализ Фурье)**.

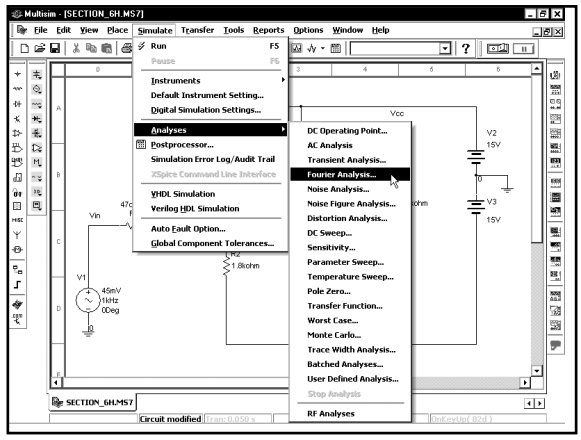
Чтобы увеличить масштаб осциллограммы входного напряжения, следует отобразить кривые на отдельных графиках. Как создать два графика и измененить их масштаб, рассказано на стр. 372–374. Осциллограммы входного и выходного напряжений для последних пяти периодов моделирования даны ниже:

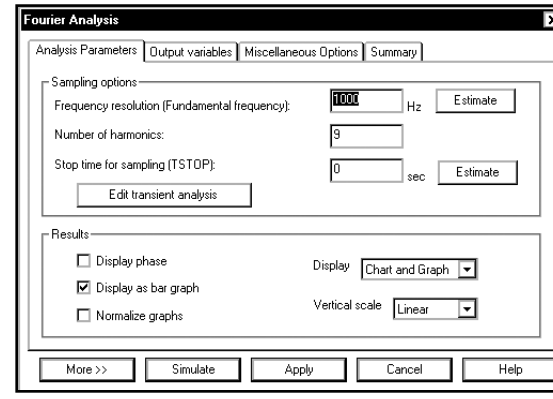


6.8.1. Анализ Фурье в программе Multisim

По результатам последнего моделирования, усилитель вносит искажения (кривая входного напряжения представляла собой синусоиду с частотой 1 кГц, а кривая выходного по форме отличалась от синусоиды). Благодаря анализу Фурье (гармоническому анализу) известно, что любую периодическую кривую можно разложить на синусоидальные кривые с различными частотами и фазовыми углами. Если бы усилитель не вносил искажений, кривая выходного напряжения содержала бы такие же частоты, как и кривая входного напряжения. При наличии на входе частоты 1 кГц сигнал на выходе тоже содержал бы только гармонику с частотой 1 кГц. Любое искажение, вносимое усилителем, определяется внесением в выходной сигнал составляющих с дополнительными частотами. С помощью анализа Фурье можно определить, какие составляющие образуют сигнал; следовательно, можно вычислить искажение, вносимое транзистором.

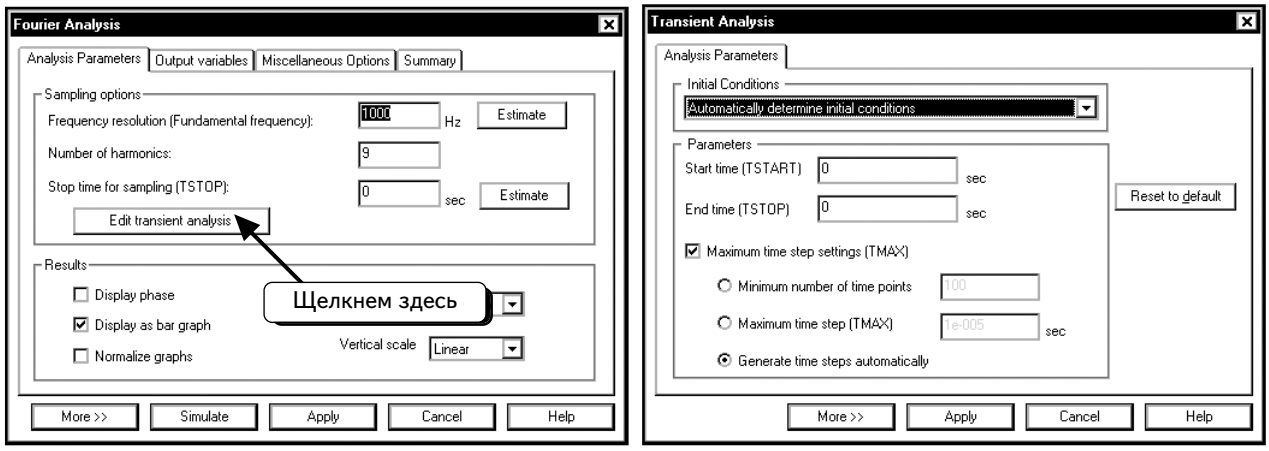
Продолжим работу со схемой предыдущего раздела. Чтобы настроить анализ Фурье, выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Fourier Analysis (Анализ Фурье)**, как показано ниже:



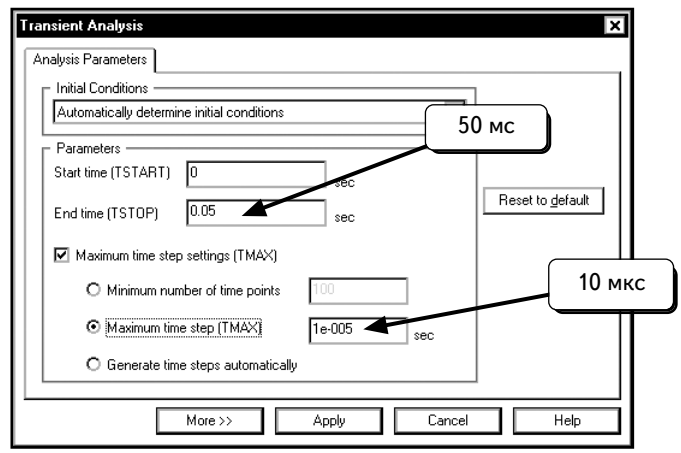


Входной сигнал — это синусоида с частотой 1 кГц. Эта частота будет самой низкой частотой выходного сигнала (или основной частотой). Таким образом, параметр ***Fundamental frequency* (Основная частота)** должен быть настроен на **1000 Hz**. Если бы входной сигнал имел другую частоту, к примеру 1,5 кГц, нам понадобилось бы изменить значение параметра на 1,5 кГц. Осциллограмма выходного напряжения будет содержать различные сигналы, которые называются гармониками (harmonics). Можно указать количество учитываемых гармоник. Воспользуемся установкой по умолчанию и учтем 9 гармоник. Настроим параметры так, как показано выше.

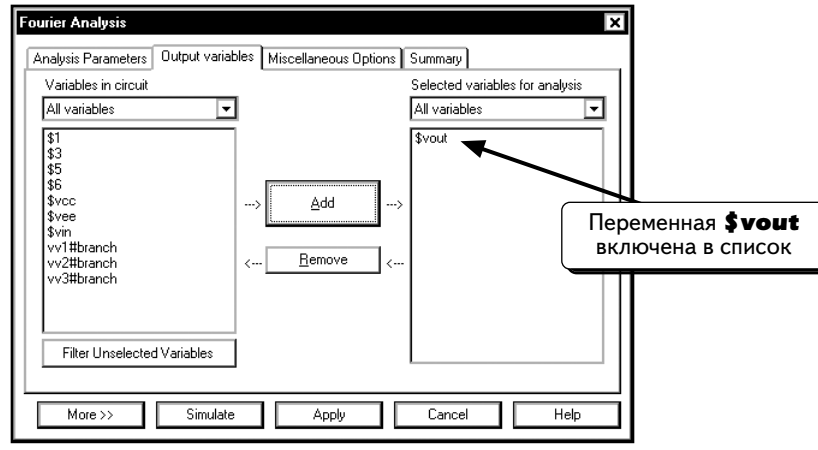
Чтобы рассчитать составляющие ряда Фурье, программе Multisim необходимо сначала выполнить анализ **Transient Analysis**. Нажмем кнопку ***Edit transient analysis*** **(Редактировать анализ переходных процессов)**:



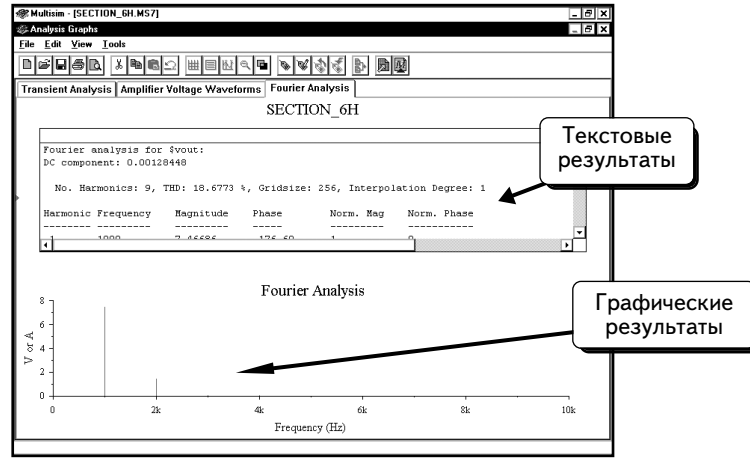
Выбраны такие же настройки, как и в предыдущем разделе. Параметр ***End time*** равен 50 мс, а параметр ***Maximum time step*** — 10 мкс :



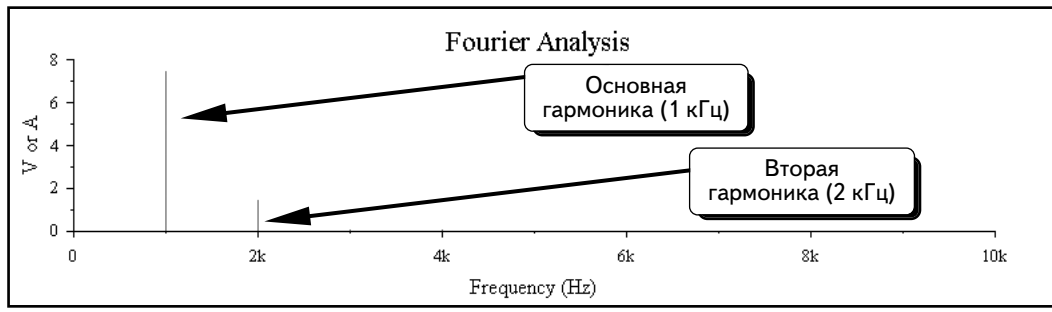
Нажмем кнопку **Apply**, чтобы вернуться к настройке анализа Фурье. Щелкнем по вкладке ***Output variables*** и выделим переменную ***$vout***:



Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:

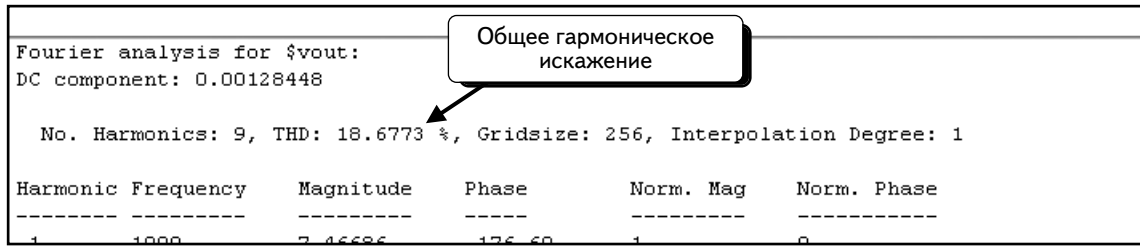


Результаты отображены в виде текста, а также на графике. График показывает, что выходной сигнал, в основном, состоит из двух частот: основной частоты (1 кГц) и второй гармоники частотой 2 кГц:

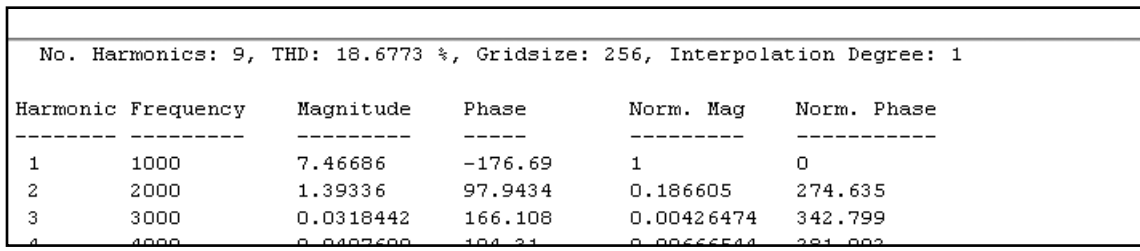


Выходной сигнал содержит и другие частоты, но они слишком малы, чтобы можно было их увидеть на графике.

Текстовая часть предоставляет нам более подробную информацию. Прежде всего, рассчитано общее искажение (THD), равное 18,6773 %:



Если просмотреть текстовое окно, то можно прочитать сведения о каждой гармонической составляющей сигнала:



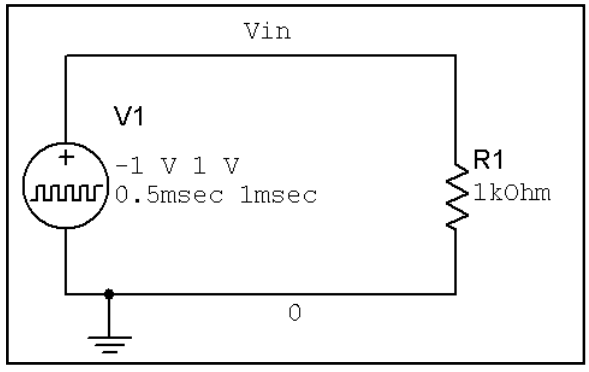
3	3000	0.0318442	166.108	0.00426474	342.799
4	4000	0.0497699	104.31	0.00666544	281.002
5	5000	0.00261411	44.1245	0.000350094	220.816
6	6000	0.00187943	108.075	0.000251703	284.767
7	7000	0.000218378	44.3526	2.92463e-005	221.044
8	8000	7.6837e-005	112.643	1.02904e-005	289.334
9	9000	1.95674e-005	86.4119	2.62057e-006	263.104

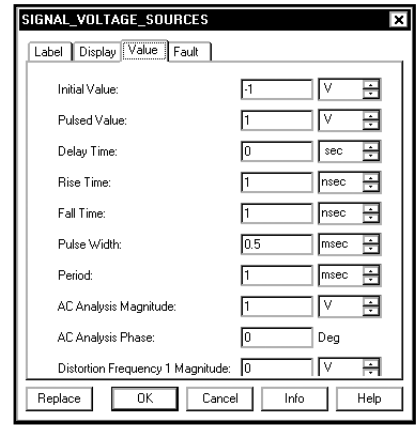
Результаты анализа Фурье показывают, что амплитуда кривой при частоте 1 кГц составляет **7,46686** В, а при частоте 2 кГц равна **1,39336** В. В текстовой части указаны данные об амплитуде сигналов, которые слишком малы, чтобы получиться на графике, а также фаза каждого компонента сигнала. Используя эти сведения, рассчитаем выходное напряжение:

$$V_o = 7{,}467 \sin(2\pi \cdot 1000t - 176{,}69^\circ) + 1{,}393 \sin(2\pi \cdot 2000t + 97{,}94^\circ) + 0{,}0318 \sin(2\pi \cdot 3000t + 166{,}1^\circ) + \ldots$$

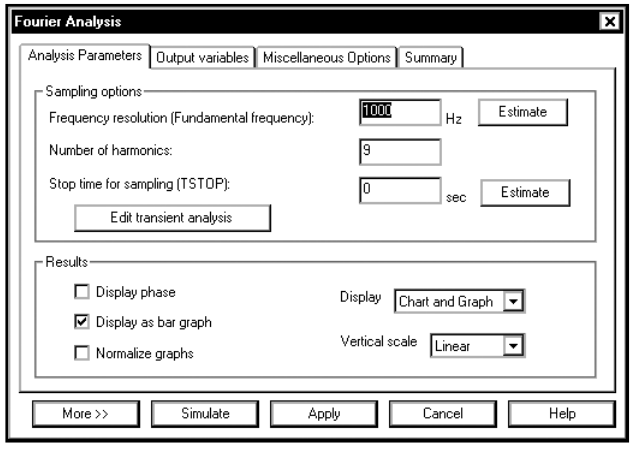
УПРАЖНЕНИЕ 6-12: С помощью анализа Фурье определите амплитуды гармоник сигнала прямоугольной формы с вершиной ±1 В и частотой 1 кГц.

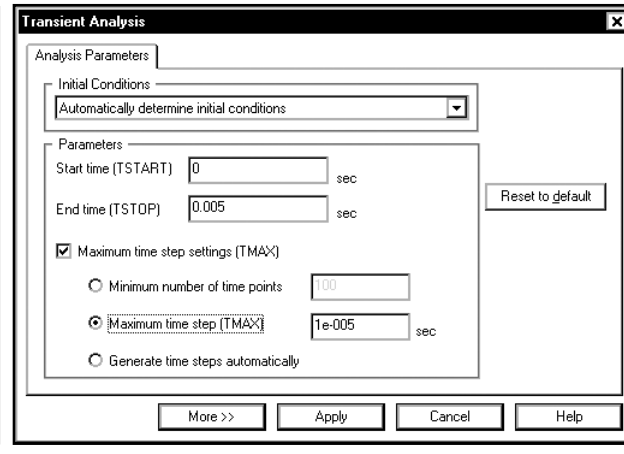
РЕШЕНИЕ: Используйте источник импульсного напряжения. Установите время нарастанияния и спада в 1 нс (то есть намного меньше ширины импульса и периода). Создайте нижеследующую схему. Атрибуты источника импульсного напряжения даны ниже:



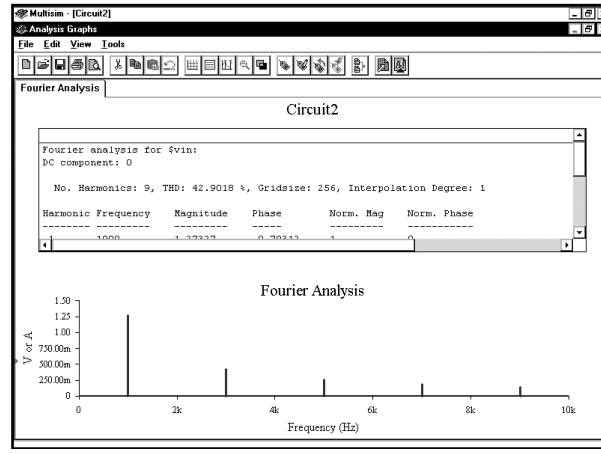


Настройте анализ Фурье и анализ переходных процессов, как показано ниже:





Результаты показаны ниже:

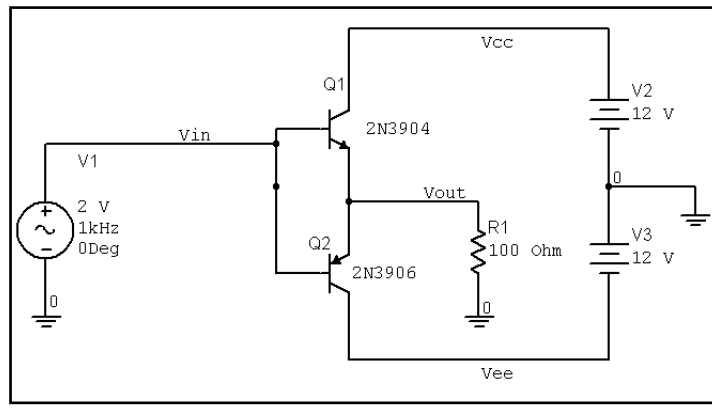


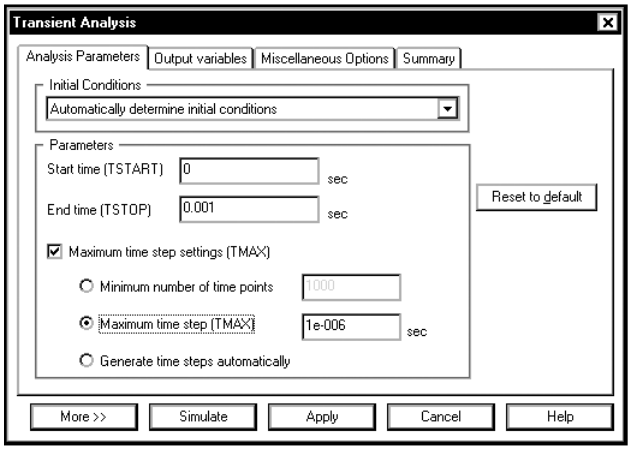

```
  No. Harmonics: 9, THD: 42.9018 %, Gridsize: 256, Interpolation Degree: 1

Harmonic  Frequency    Magnitude     Phase        Norm. Mag     Norm. Phase
--------  ---------    ---------     -----        ---------     -----------
 1        1000         1.27327       -0.70312     1             0
 2        2000         3.03577e-017  36.8699      2.38423e-017  37.573
 3        3000         0.424509      -2.1094      0.3334        -1.4062
 4        4000         4.20877e-017  164.46       3.30548e-017  165.163
 5        5000         0.254808      -3.5156      0.200121      -2.8125
 6        6000         6.30689e-017  125.767      4.95329e-017  126.47
 7        7000         0.182115      -4.9219      0.143029      -4.2188
 8        8000         7.05302e-017  -125.74      5.53929e-017  -125.04
 9        9000         0.141759      -6.3281      0.111335      -5.625
```

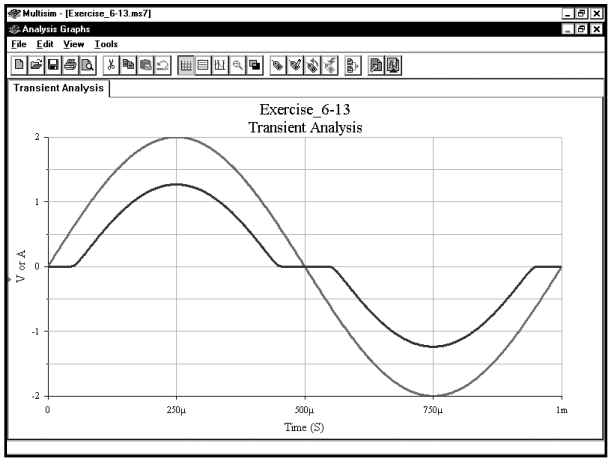
УПРАЖНЕНИЕ 6-13: Определите, какие гармоники содержатся в выходном сигнале двухтактного усилителя при искажениях, связанных с переходом через ноль. Входное напряжение усилителя имеет амплитуду 2 В при частоте 1 кГц. Усилитель нагружен на резистор в 100 Ом. Выполните анализ переходных процессов, чтобы получить осциллограммы. Выполните анализ Фурье, чтобы рассчитать уровень гармонических искажений:

РЕШЕНИЕ: Создайте схему, показанную ниже. Выполните анализ переходных процессов для одного периода с большим количеством точек моделирования:

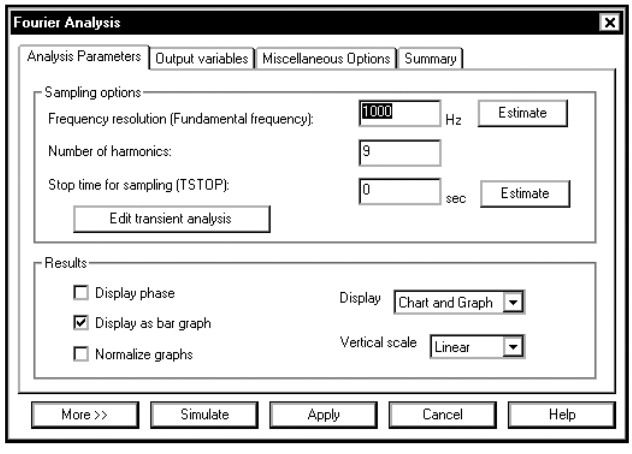


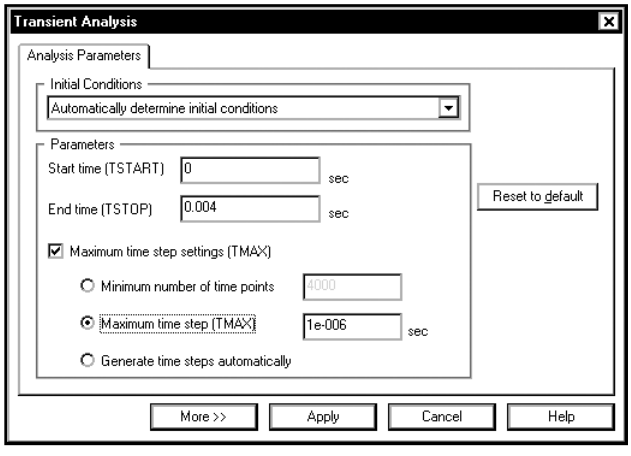


Осциллограммы входного и выходного напряжений:

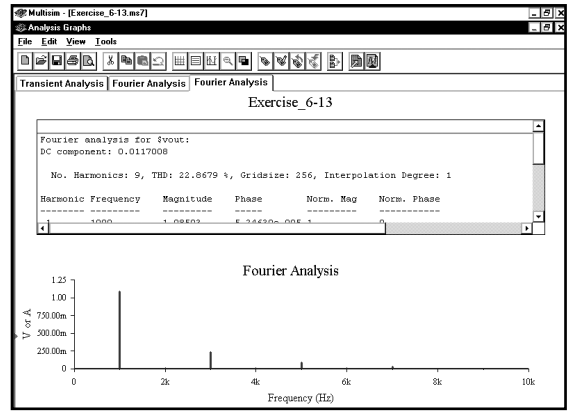


Настройки анализа Фурье показаны ниже. Проведите анализ переходного процесса для четырех периодов, чтобы обеспечить более точные данные для гармонического анализа.





Результаты анализа Фурье:

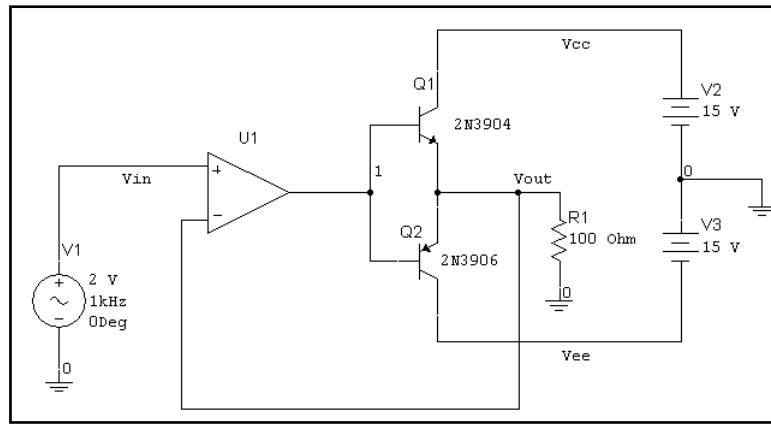


No. Harmonics: 9, THD: 22.8679 %, Gridsize: 256, Interpolation Degree: 1

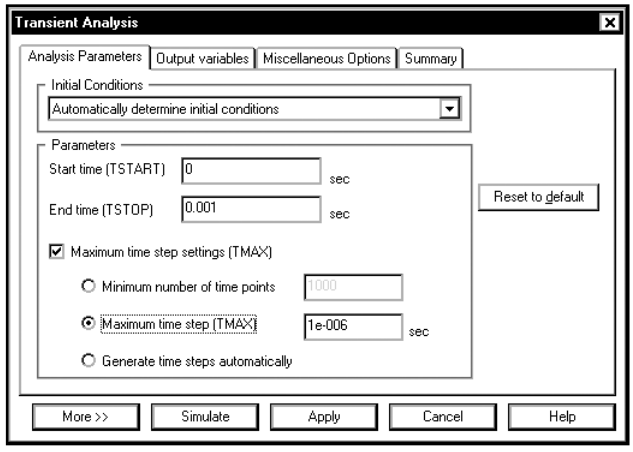
Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
1	1000	1.08593	5.24639e-005	1	0
2	2000	0.00626112	-89.952	0.00576568	-89.952
3	3000	0.230321	179.998	0.212096	179.998
4	4000	0.00453029	-89.864	0.00417181	-89.864
5	5000	0.0880167	179.992	0.081052	179.992
6	6000	0.00249281	-89.669	0.00229555	-89.669
7	7000	0.0283589	179.98	0.0261148	179.98
8	8000	0.000715386	-89.018	0.000658778	-89.018
9	9000	0.00140767	179.861	0.00129628	179.861

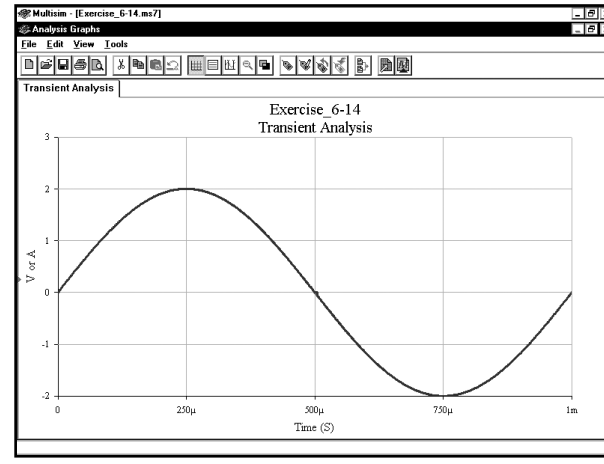
Вы видите, что основные максимумы частотной характеристики приходятся на частоты 1, 3, 5 и 7 кГц. Выходной сигнал содержит частоты, которых нет во входном сигнале, следовательно, усилитель вносит искажения. Коэффициент гармоник составляет ***22,8679 %.***

УПРАЖНЕНИЕ 6-14: Используя схему обратной связи (feedback), можно уменьшить искажения, вносимые усилителем. Повторите предыдущее упражнение для схемы, показанной ниже. В ней используется виртуальный ОУ, так как реальные ОУ не могут управлять двухтактным усилителем. Обратите внимание: напряжения источников питания были изменены на 15 В:



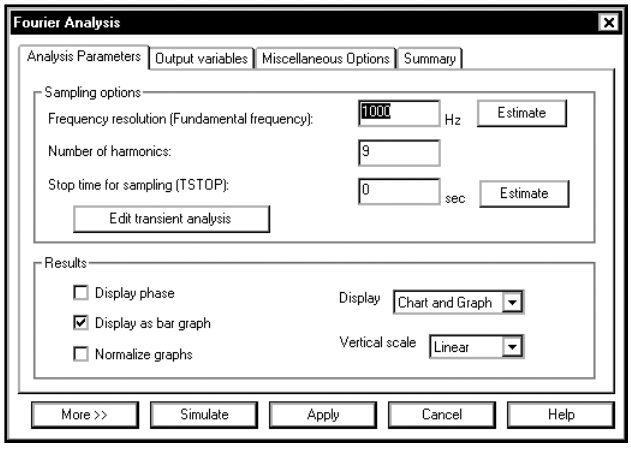
РЕШЕНИЕ: Выполните анализ переходных процессов для одного периода с большим количеством точек моделирования. Осциллограммы входного и выходного напряжений приведены ниже:

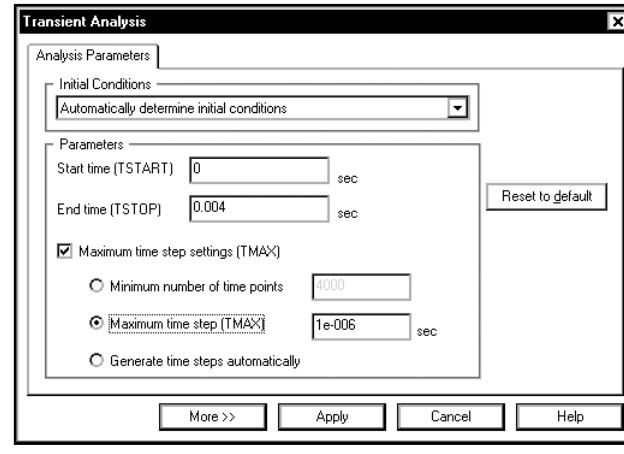




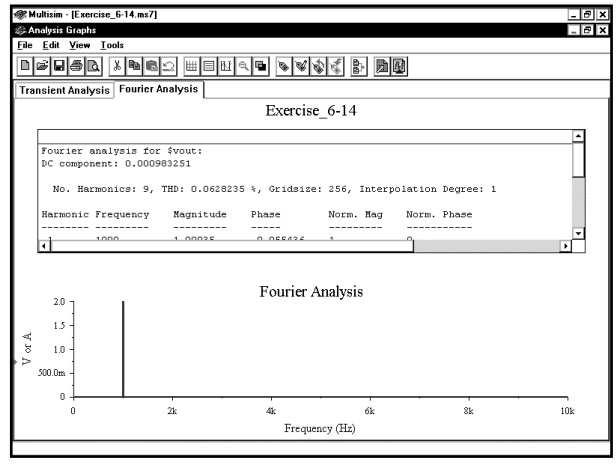
Как видим, осциллограммы входного и выходного напряжений выглядят одинаково, т. к. схема обратной связи уменьшает искажения, вносимые усилителем.

Используйте для анализа Фурье настройки, показанные ниже. Для анализа переходных процессов смоделируйте схему из четырех циклов.





Результаты анализа Фурье:



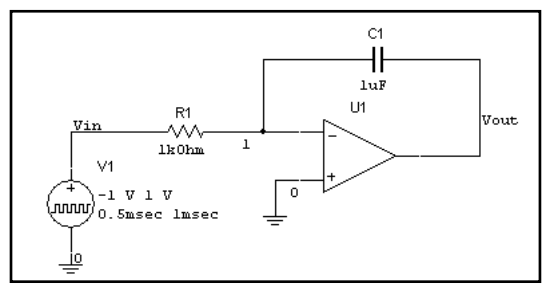
No. Harmonics: 9, THD: 0.0628235 %, Gridsize: 256, Interpolation Degree: 1

Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
1	1000	1.99935	-0.055436	1	0
2	2000	2.62526e-005	-97.236	1.31305e-005	-97.181
3	3000	0.000557384	-90.438	0.000278782	-90.383
4	4000	7.10635e-006	-93.237	3.55432e-006	-93.182
5	5000	0.000562046	-82.484	0.000281114	-82.428
6	6000	0.000148985	10.4093	7.45165e-005	10.4647
7	7000	0.000726638	-101.83	0.000363437	-101.78
8	8000	0.000109421	-60.98	5.47285e-005	-60.925
9	9000	0.000623066	-105.64	0.000311634	-105.58

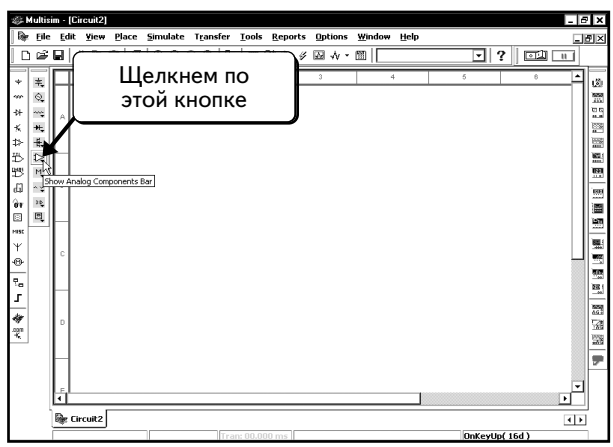
Видно, что амплитуда большей части гармоник существенно снижена. Коэффициент гармоник составляет 0,0628 %. Такой усилитель имеет два недостатка: 1) большинство реальных ОУ не могут управлять двухтактными усилителями, работающими на нагрузку большой мощности, 2) транзисторы могут часть периода работать в режимах насыщения и отсечки. В итоге появляется задержка по фазе, которая может привести к возбуждению усилителя. Если настроить усилитель на работу в активной области, то будет получен лучший результат. Данный пример был выбран, чтобы показать, как схема обратной связи уменьшает искажение.

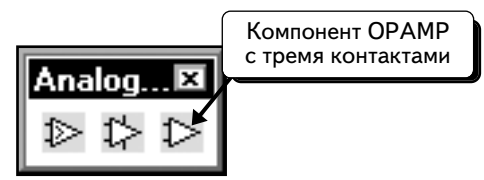
6.9. Интегрирующая схема на виртуальном ОУ

В этом разделе будет показано, как исследовать интегрирующую схему на виртуальном ОУ с тремя выводами, используя генератор импульсного напряжения на входе. Создадим схему, в которой применен виртуальный ОУ, находящийся на панели инструментов **Analog Components**. Будем конфигурировать его как идеальный ОУ, необходимый для корректной работы схем данного раздела:



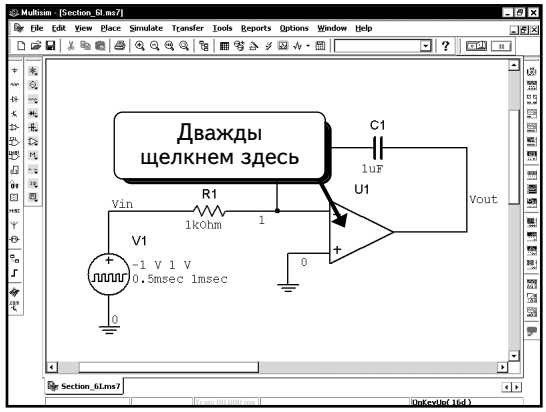
Чтобы добавить виртуальный ОУ, щелкнем по кнопке ***Show Analog Components Bar*** :

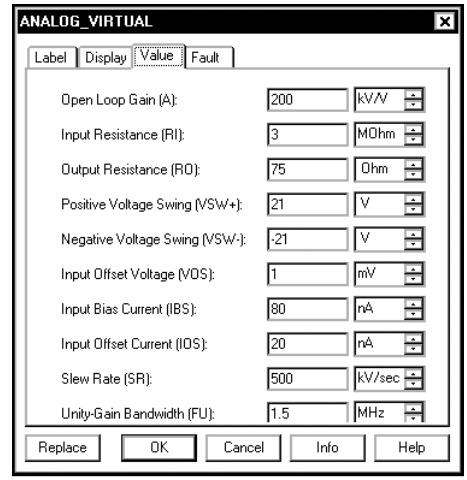




Эта панель инструментов позволяет выбрать виртуальные ОУ (с тремя или пятью выводами) или виртуальный компаратор. Выберем виртуальный компонент ОУ с тремя выводами и добавим его в схему. Подключим остальные компоненты схемы.

Чтобы просмотреть параметры ОУ, дважды щелкнем по его иконке:

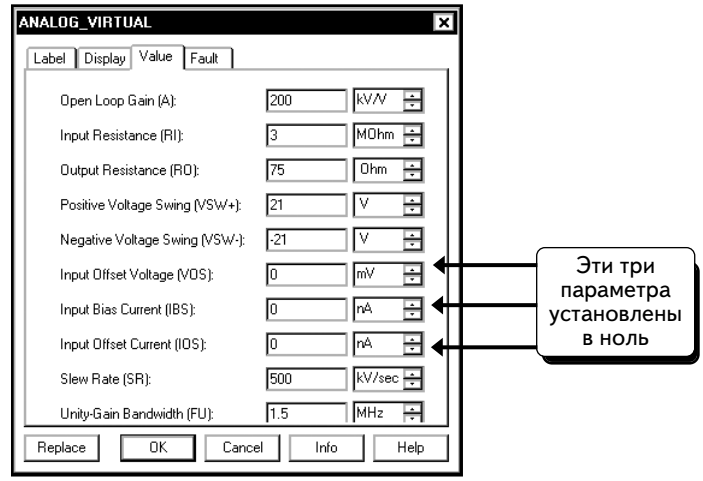




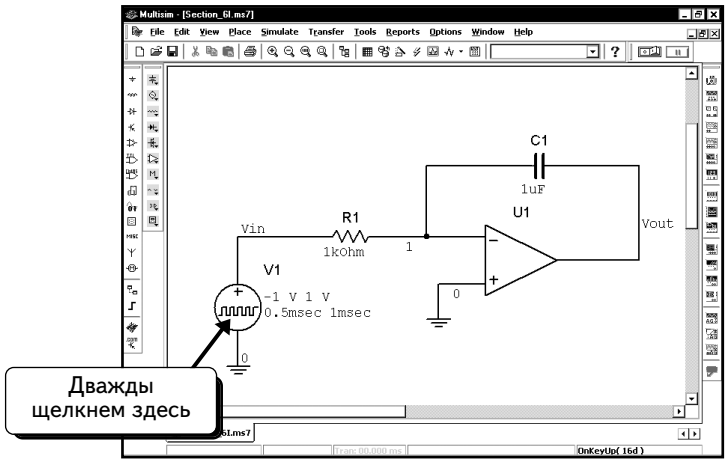
Для правильной работы схемы необходимо, чтобы ОУ не имел тока смещения или напряжения смещения. Зададим для параметров ***Input Offset Voltage (VOS)*** **(Напряжение смещения на входе)**, ***Input Bias Current (IBS)*** **(Ток смещения на входе)** и ***Input Offset Current (IOS)*** **(Ток смещения на входе)** нулевые значения. Эти параметры для неидеальных ОУ могут привести к неверной работе схемы. Выбрав нулевые значения, получим правильную работу идеальной схемы.

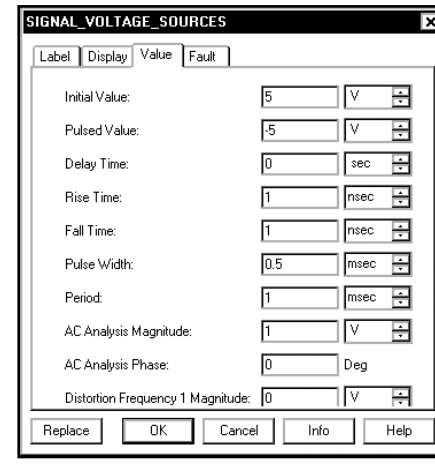
Недостаток идеальной схемы состоит в том, что не учитывается неидеальность параметров реальных микросхем. Если бы в данном примере использовалась обычная модель ОУ, интегрирующая схема не могла бы работать из-за токов смещения. Следовательно, модель схемы с обычным ОУ дает такой же результат, какой был бы получен в лаборатории, а модель схемы с идеальным ОУ его не воспроизводит. Схема с идеальным ОУ использована только для демонстрации принципов работы интегрирующей схемы. (Информация о работе интегрирующей схемы с обычными ОУ приведена в **`УПРАЖНЕНИИ 6.16`**). **В целом отметим, что по возможности следует использовать только обычные модели ОУ.** Обратите внимание: виртуальные и идеальные модели ОУ — это не одно и то же. Можно изменять параметры виртуальных ОУ и при необходимости настраивать их на моделирование идеальных ОУ.

Изменим настройки виртуального ОУ, как показано ниже. Были заданы нулевые значения для тока и напряжения смещения:



Используем источник импульсного напряжения, чтобы создать входной сигнал с частотой 1 кГц и амплитудой 5 В (с размахом напряжения от –5 до +5 В). Дважды щелкнем по иконке источника импульсного напряжения, чтобы изменить его настройки. Изменим параметры, как показано ниже:

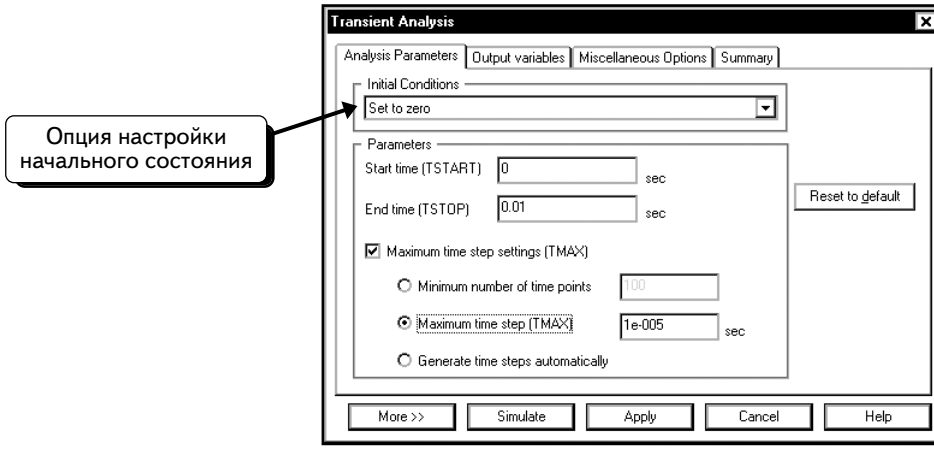




Параметры источника импульсного напряжения были описаны в разделе 6.7 на с. 386–388. Временная диаграмма напряжения будет выглядеть следующим образом. Начальное значение напряжения равно **5** В. После периода задержки (в нашем случае равного 0 с) выходной сигнал мгновенно переходит на уровень напряжения импульса **–5** В. После времени задержки (0 с) и времени, определяющего ширину импульса (0,0005 с), напряжение скачком возвращается начальному значению в **5** В. На интервале от 0,0005 до 0,001 с (интервал, равный ширине импульса) напряжение остается на уровне **5** В, затем в момент времени 0,001 с снова скачком изменяется до напряжения импульса **–5** В, и цикл повторяется.

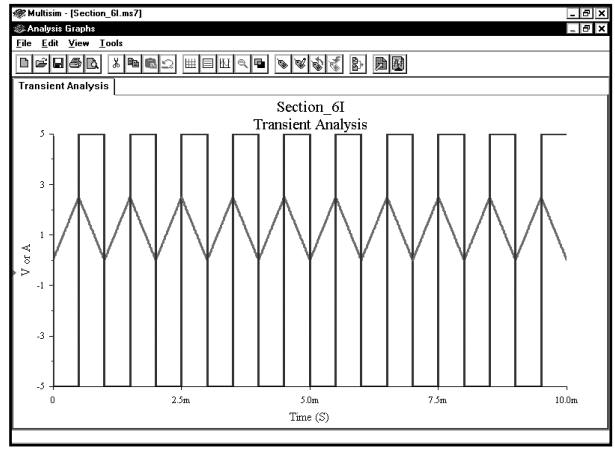
Важно заметить, что при расчете смещения, которое определяет начальное напряжение на конденсаторе, программа Multisim настраивает напряжение источника импульса на начальное значение. При заданной настройке временной диаграммы выходного напряжения начальное напряжение конденсатора рассчитывается с учетом того, что значение Vin составляет 5 В. В результате начальное напряжение интегратора будет равно бесконечности. Чтобы избежать этого, следует установить начальное значение напряжения на конденсаторе равным 0 В. Это можно сделать несколькими способами. Можем задать нулевое начальное значение, а затем указать, что программа Multisim должна использовать начальные значения. Можно настроить все начальные значения параметров на 0, указав это при настройке анализа переходных процессов.

Зададим время моделирования переходных процессов равным 10 периодам. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis**. Введем значения параметров, как показано ниже:



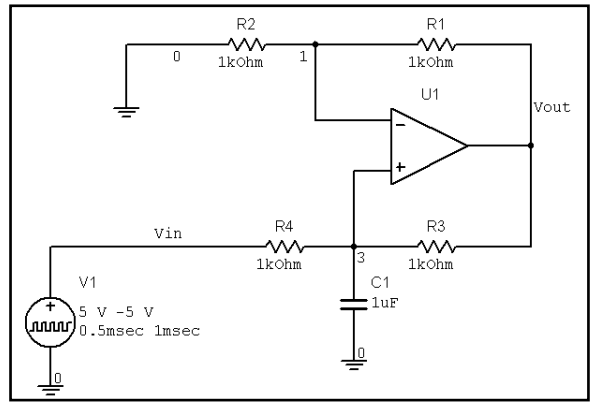
Обратите внимание: для всех параметров установлены нулевые начальные значения. Установим время моделирования равным 10 периодам при частоте 1 кГц (или 10 мс). Установим также максимальный размер шага в 10 мкс, что позволит получить более точный результат.

Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменные **$vout** и **$vin**. Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить анализ переходных процессов:

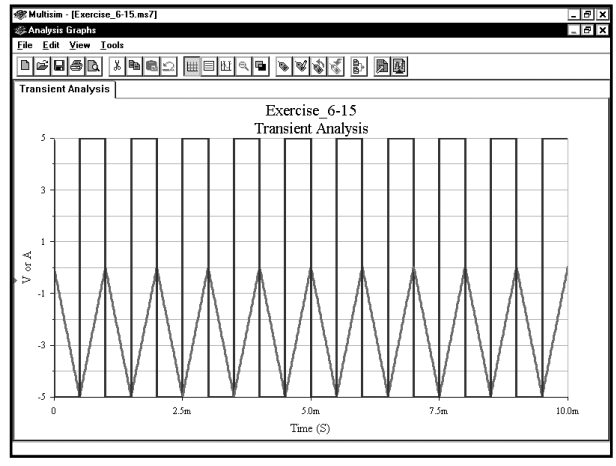


Как видно из осциллограммы, в результате интегрирования напряжения прямоугольной формы получается напряжение треугольной формы.

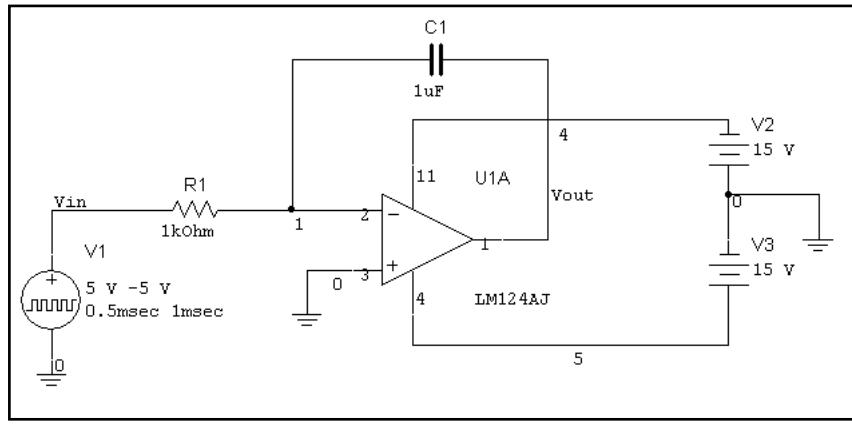
УПРАЖНЕНИЕ 6-15: Проведите моделирование для интегрирующей схемы, показанной ниже. Задайте нулевое начальное напряжение на конденсаторе. Получите осциллограмму выходного напряжения при частоте входного напряжения, равного 1 кГц. Обратите внимание: если изменить сопротивления резисторов, схема может не работать. Данная схема отлично подходит для демонстрации, но ее нельзя использовать на практике. Можно также смоделировать схему с обычными ОУ, чтобы увидеть эффект, вызванный током и напряжением смещения:



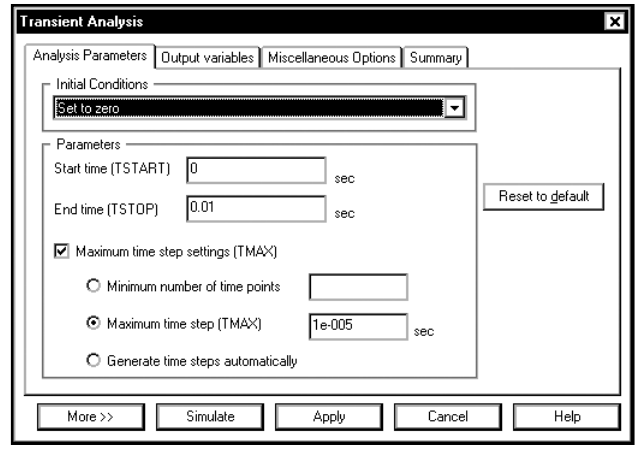
РЕШЕНИЕ: Результаты, полученные после выполнения анализа переходных процессов:



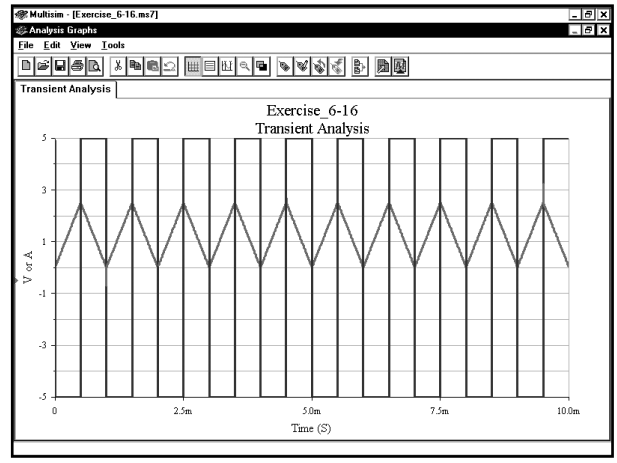
УПРАЖНЕНИЕ 6-16: Проведите моделирование для предыдущей схемы, включив в нее обычный ОУ, например микросхему LM124AJ:



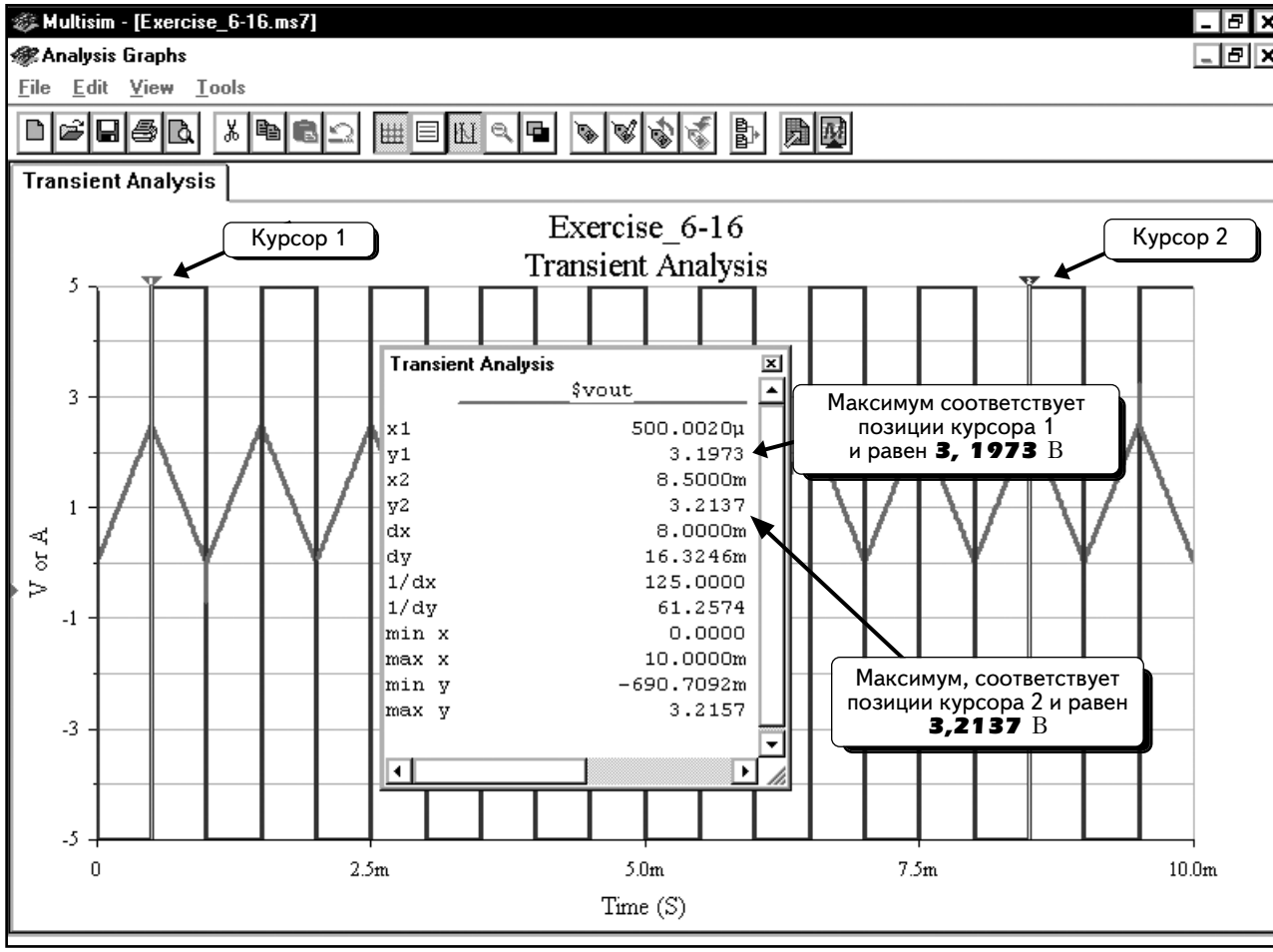
РЕШЕНИЕ: Обязательно задайте нулевое начальное напряжение на конденсаторе. Сначала выполните моделирование для интервала в 10 мс:



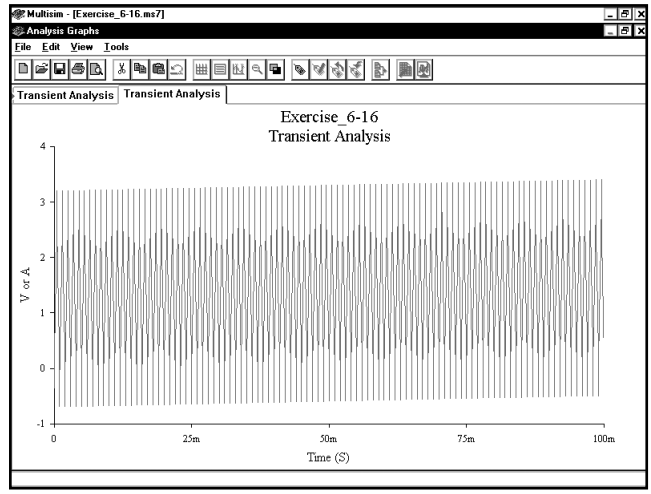
Кривая выходного напряжения показана ниже:



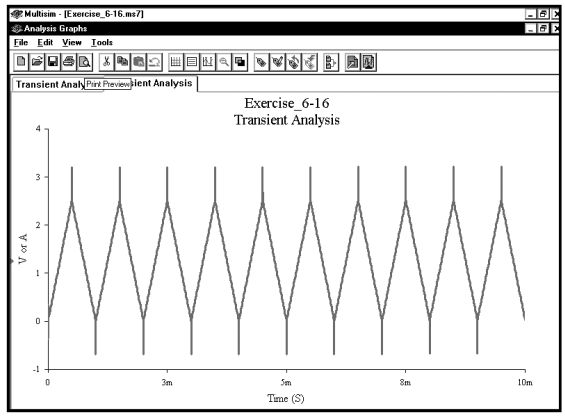
На первый взгляд кажется, что график выглядит так же, как и график модели с идеальным компонентом OPAMP. Если воспользоваться курсорами и проверить максимальные значения, то видно, что они немного смещены в положительном направлении:

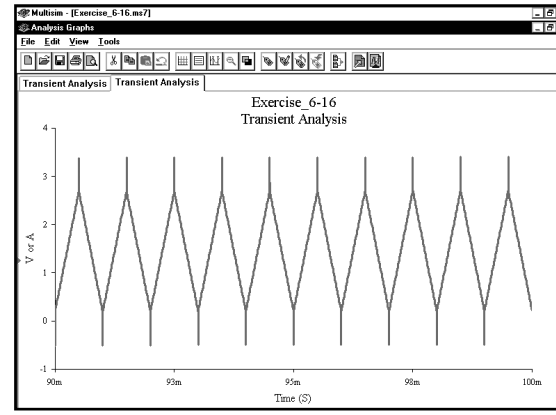


Курсору 1 соответствует максимальное значение в **3,1973** В, курсору 2 — максимальное значение в **3,2137** В, то есть на 0,0164 В больше. Повторим моделирование для интервала в 100 мс:



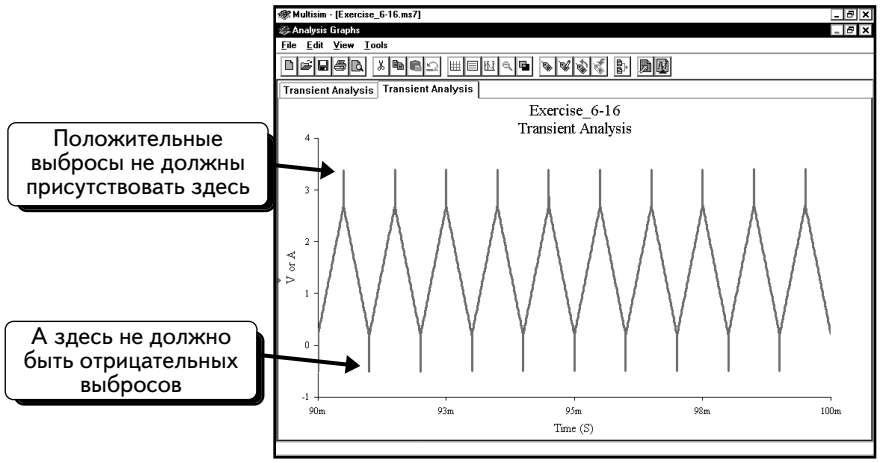
Видно, что кривая выходного напряжения быстро смещается к положительному значению. Ниже показано увеличенное изображение осциллограммы выходного напряжения в начале (время близко к 0) и в конце моделирования (время близко к 100 мс).





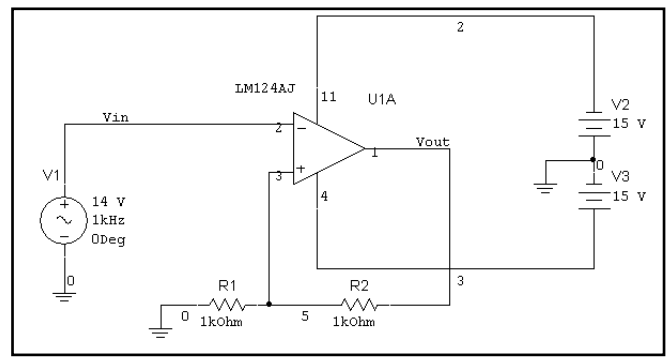
Если будем выполнять моделирование в течение длительного времени, ОУ перейдет в режим насыщения. В итоге выходное напряжение установится на уровне положительного питающего напряжения. Дрейф выходного напряжения вызван током смещения ОУ.

Короткие импульсы в верхних и нижних точках осциллограммы выходного напряжения не должны появляться в реальных схемах; их появление является следствием, скорее всего, несовершенства модели ОУ:



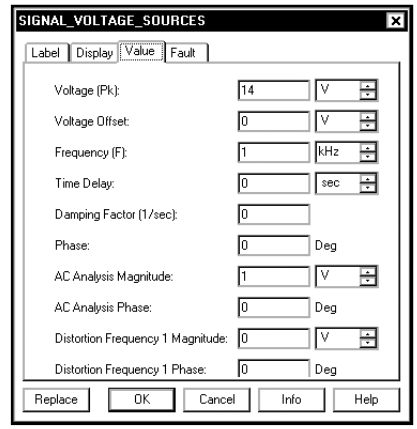
6.10. Триггер Шмитта на операционном усилителе

В этом разделе будет исследован триггер Шмитта на ОУ. Необходимо выбрать обычный ОУ, так как идеальная модель имеет проблемы при работе в схеме триггера Шмитта. Кроме того, триггер Шмитта требует применения ОУ с ограничением, позволяющим ОУ переходить в режим насыщения, когда выходное напряжение устанавливается на уровне положительного источника питания. Создадим схему:



Она представляет собой триггер Шмитта на ОУ с порогами переключения приблизительно 7,5 В. Воспользуемся источником синусоидального напряжения, чтобы периодически изменять входной сигнал от +14 до –14 В и затем от –14 до +14 В. Частота источника составляет 1 Гц; это позволяет устранить влияние коэффициента нарастания выходного напряжения (slew rate) ОУ на работу триггера Шмитта. Если хотим сохранить это влияние, то нужно выбрать более высокое значение частоты. А чтобы временная диаграмма источника начиналась не в нулевой точке, а в точке –14 В, необходимо установить начальную фазу источника равной 90°.

Так как в предыдущих разделах не было рассказано о многих атрибутах синусоидального источника напряжения, поговорим о них здесь. Эти параметры показаны ниже:



Источник напряжения описывается с помощью уравнения:

Это выражение представляет собой константу

$$V_{\sin} = \begin{cases} B - A\sin\left(\left(\frac{2\pi}{360}\right)\varphi\right) & \textit{при} \quad 0 \le t < \tau_d \\ B + A\sin\left[2\pi\ F\left(t-\tau_d\right) - \left(\frac{2\pi}{360}\right)\varphi\right]e^{-\beta(t-\tau_d)} & \textit{при} \quad t \ge \tau_d \end{cases}.$$

Значение и единицы для переменных, используемых в этой формуле, приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

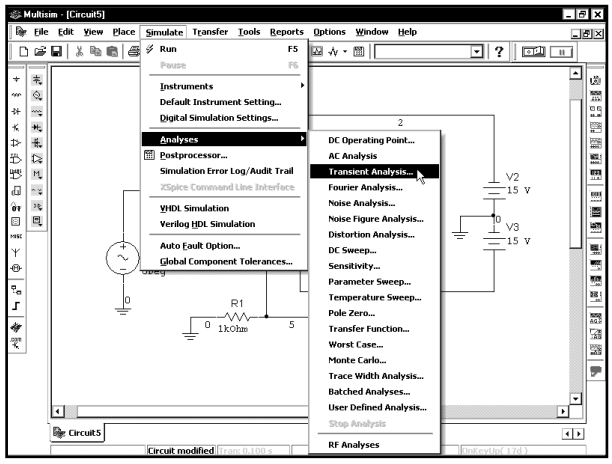
Величина	Обозначение	Единицы
Фаза	φ	град
Напряжение смещения	B	В
Амплитуда напряжения	A	В
Частота	F	Гц
Коэффициент затухания	β	$с^{-1}$
Время задержки	τ_d	с

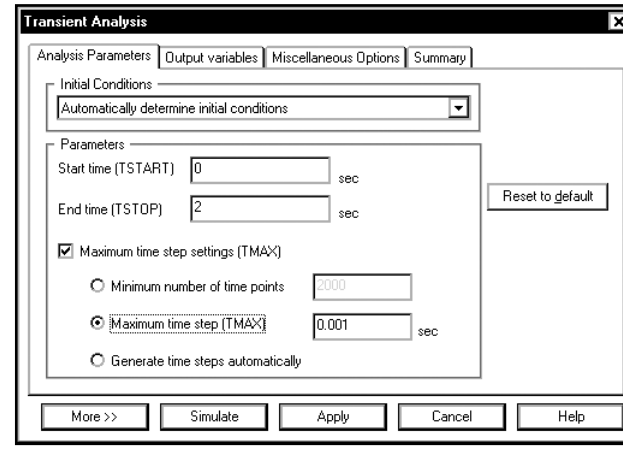
Формула кажется сложной. Источник напряжения может быть затухающим, иметь постоянное смещение, а также задержку по времени или фазе. В данном равенстве фаза ϕ указывается в градусах, она может быть переведена в радианы с помощью константы 2π/360. Источник напряжения V_{sin} является константой при $\tau_d \geqslant t \geqslant 0$. Изменение начинается только после $t = \tau_d$. Если задержки по времени и фазе отсутствуют, уравнение упрощается и сводится к следующему:

$$V_{\sin} = B + A\sin\left[2\pi\ Ft\right]e^{-\beta t}.$$

Источники, доступные для функции **Transient Analysis**, обладают высокой гибкостью и предлагают пользователю большой выбор диаграмм выходного напряжения. К сожалению, если отсутствует опыт, эта гибкость может вызвать затруднения.

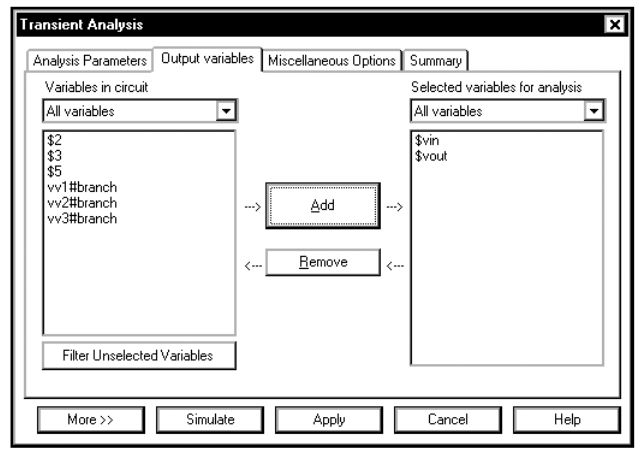
Настроим анализ переходных процессов так, чтобы моделирование было выполнено для двух периодов источника синусоидального напряжения. Так как источник имеет частоту 1 Гц, два периода занимают 2 с. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis** и введем значения:



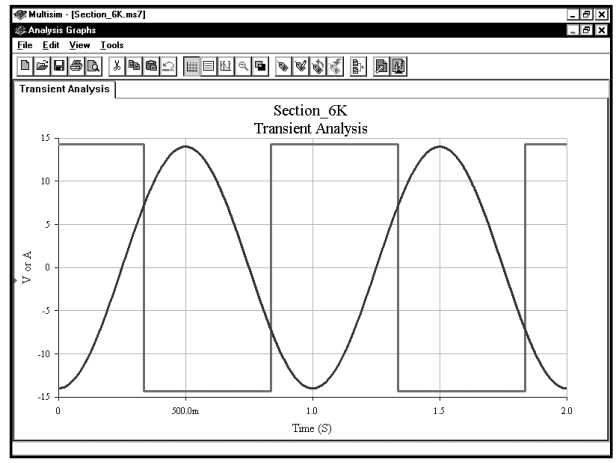


Мы выбрали для параметра **Maximum time step** значение 1 мс, чтобы получить точные результаты при переключениях триггера Шмита.

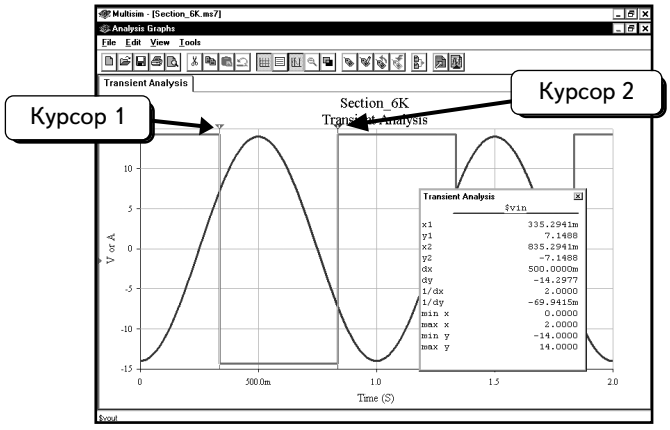
Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменные **$vin** и **$vout** :



Щелкнем по кнопке **Simulate**, чтобы выполнить моделирование :



Используя курсоры, можно измерить напряжения переключения триггера Шмитта:

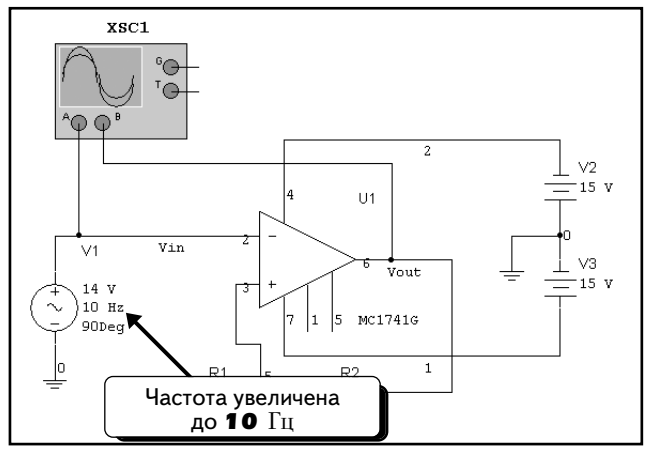


Transient Analysis

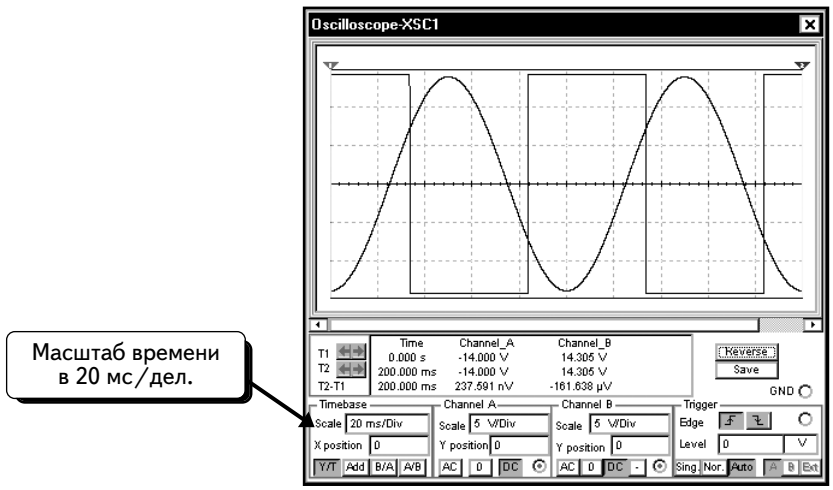
	$vin
x1	335.2941m
y1	7.1488
x2	835.2941m
y2	-7.1488
dx	500.0000m
dy	-14.2977
1/dx	2.0000
1/dy	-69.9415m
min x	0.0000
max x	2.0000
min y	-14.0000
max y	14.0000

Видно, что триггер Шмитта меняет состояние при Vin = ±7,15 В.

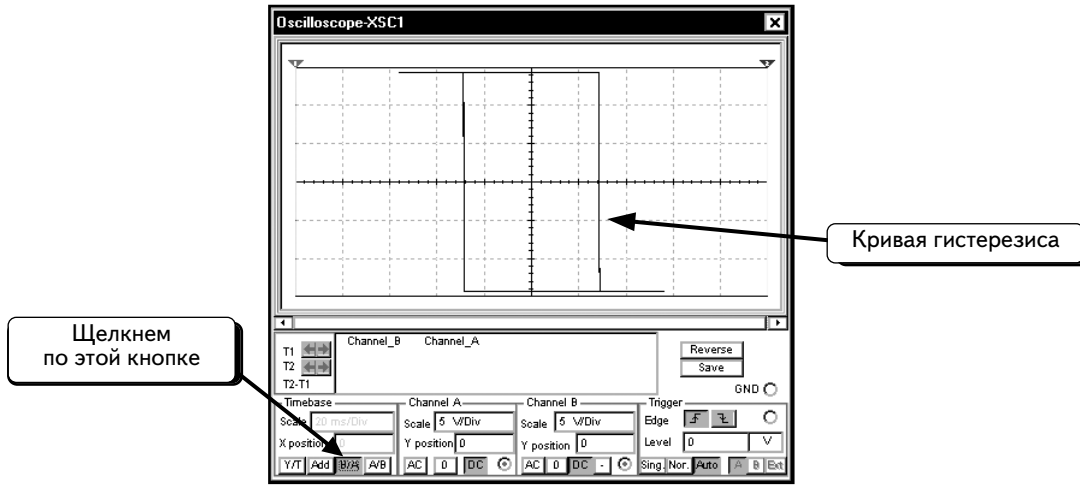
Теперь получим кривую гистерезиса для триггера Шмитта. Кривая гистерезиса показывает зависимость V_O от V_{IN}. Для этого нужно получить осциллограммы V_O от V_{IN} на экране осциллографа, а затем изменить режим развертки. Подключим осциллограф к схеме и подадим напряжение от узла **Vin** на канал **A**, а от узла **Vout** — на канал **B**. Увеличим частоту источника **V1** до **10** Гц :



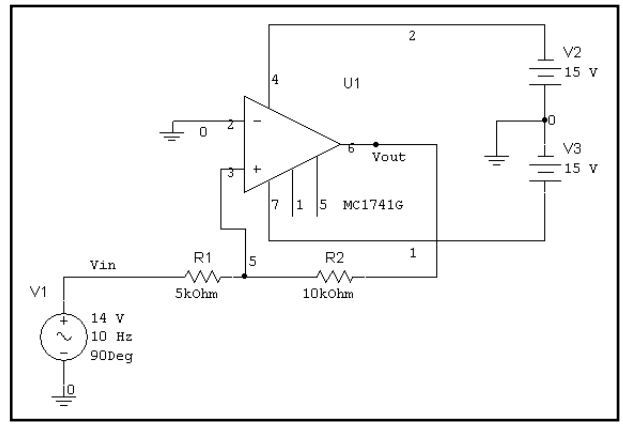
Нажмем кнопку **Run/stop simulation** , чтобы выполнить моделирование. Дважды щелкнем по инструменту Oscilloscope, чтобы отобразить осциллограммы. Изменим значение параметра **Timebase** на **20 ms/Div**; осциллографу понадобится больше времени на обработку осциллограмм. Кривая дана ниже:



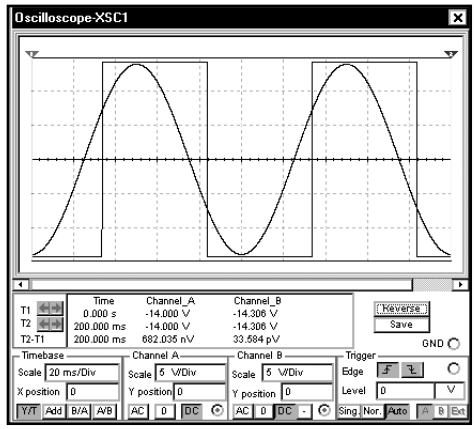
Чтобы отобразить кривую гистерезиса, достаточно установить режим **B/A** для развертки осциллографа. Щелкнем по кнопке **B/A**:

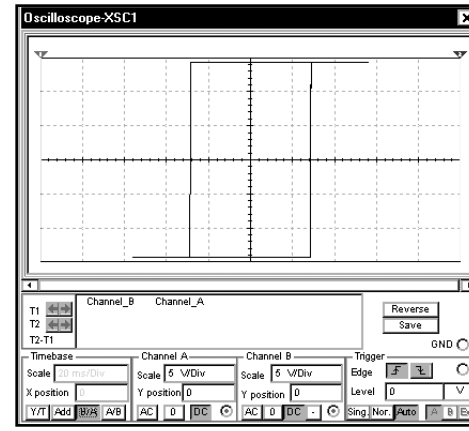


УПРАЖНЕНИЕ 6-17: Выполните моделирование для неинвертирующего триггера Шмитта при входном напряжения 14 В:



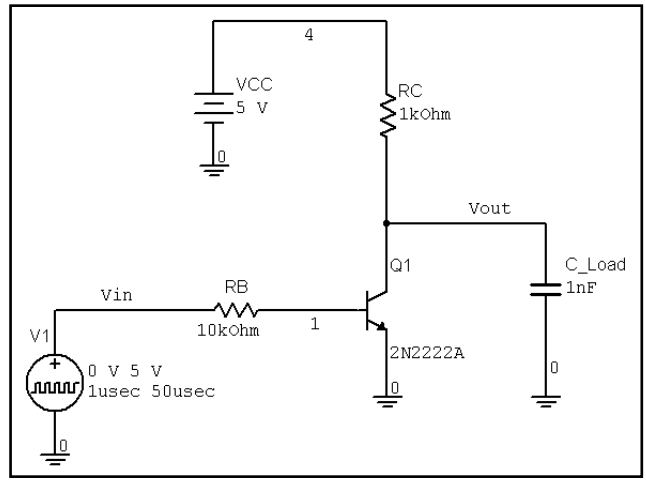
РЕШЕНИЕ: Используйте синусоидальный источник напряжения. Осциллограммы входного и выходного напряжения показаны слева, а кривая гистерезиса — справа:



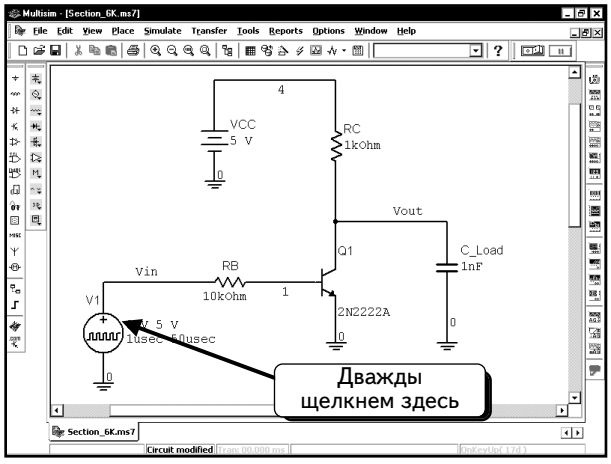


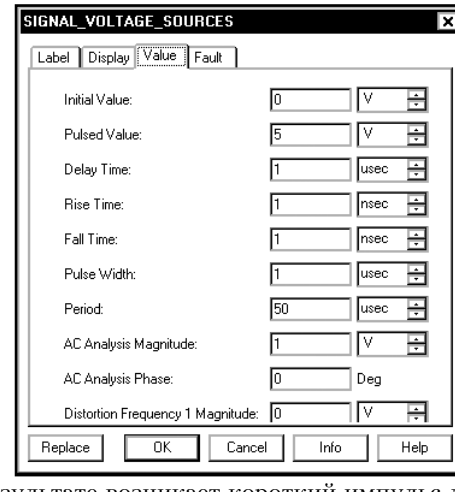
6.11. Многовариантный анализ. Скорость переключения инвертора

При создании цифровых схем нужно учитывать, как различные компоненты влияют на работу схемы. В этом разделе поговорим о скорости переключения. Сначала изучим работу стандартного инвертора на биполярном транзисторе BJT. Создадим схему:



Входное напряжение инвертора представляет собой короткий импульс длительностью в 1 мкс. Дважды щелкнем по иконке источника импульсного напряжения, чтобы просмотреть список параметров. Изменим настройки, как показано:

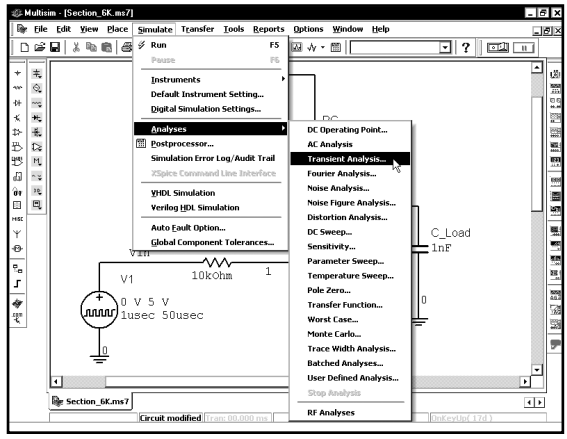


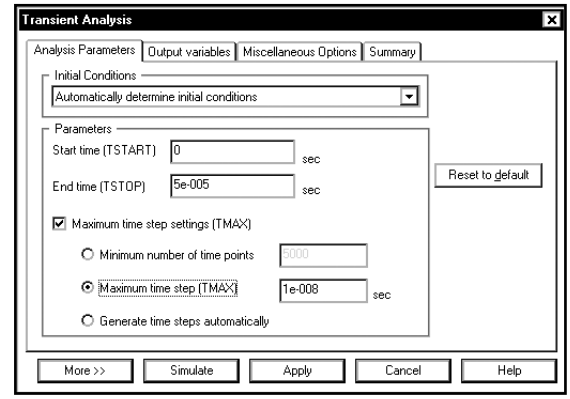


Ширина импульса составляет 1 мкс при периоде в 50 мкс. В результате возникает короткий импульс длительностью 1 мкс, который повторяется через каждые 50 мкс. Выполним моделирование на интервале 50 мкс и увидим лишь один импульс. По умолчанию импульс начинается сразу после запуска моделирования. Но мы изменили время задержки на 1 мкс, следовательно, начальное значение импульса (0 В) сохраняется в течение 1 мкс, а затем начинается импульс. Время нарастания и время спада равны 1 нс, так как мы изучаем скорость переключения и хотим, чтобы управляющий импульс изменялся очень быстро.

Будем использовать анализ переходных процессов, а не виртуальное моделирование, т. к. нас интересует реакция схемы на изменение сопротивления коллекторного резистора RC, а в виртуальной модели нет возможности выполнить многовариантный анализ. Сначала выполним анализ переходных процессов, чтобы изучить реакцию схемы на одно значение RC. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis**.

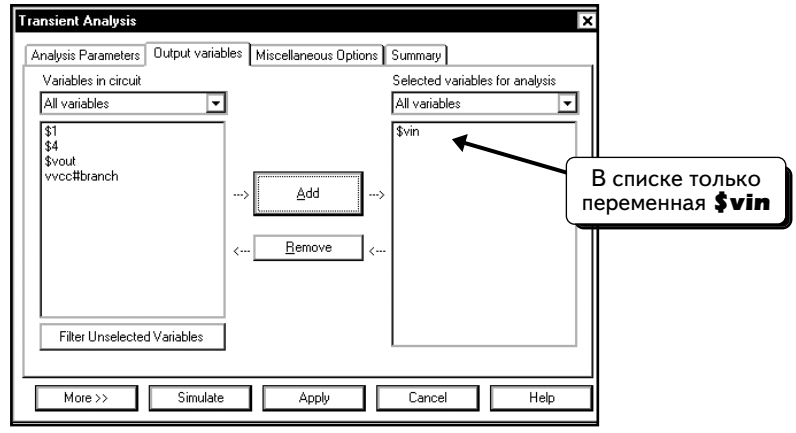
Введем данные в диалоговом окне так, как показано:



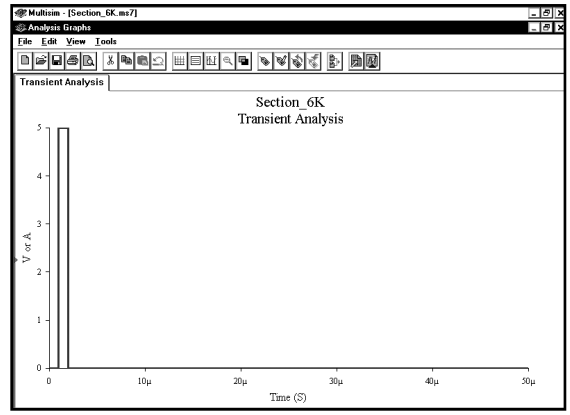


Обратите внимание: параметр **End time** настроен на 50 мкс, а параметр **Maximum time step** — на 10 нс.

Сначала проверим импульс входного напряжения. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменную **$vin**:



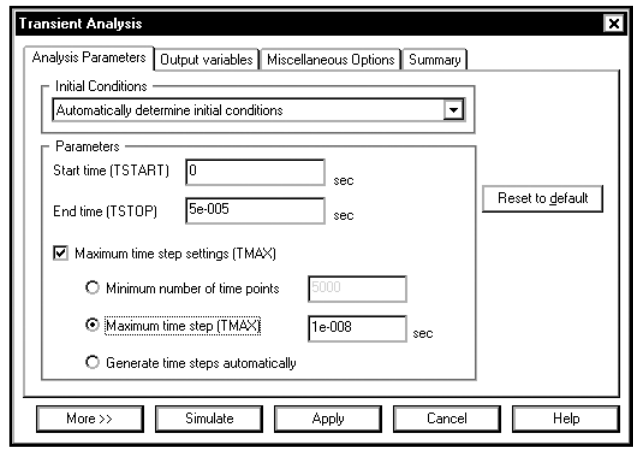
Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Осциллограмма входного напряжения должна выглядеть так, как показано ниже:



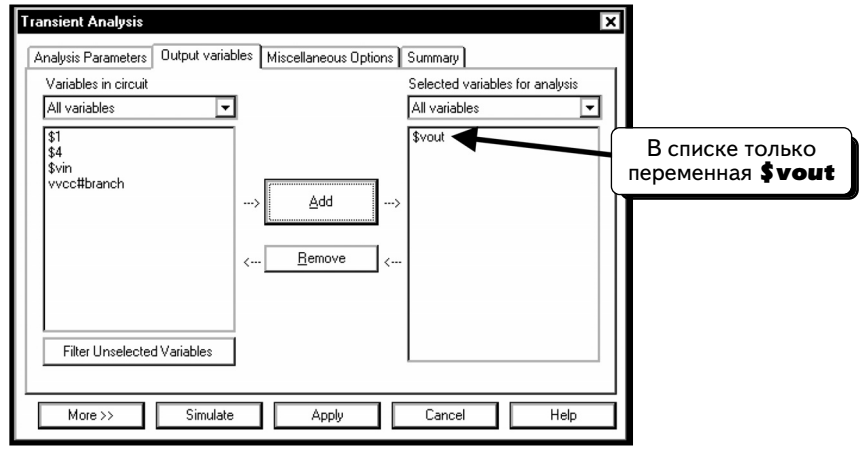
Виден импульс от 0 до 5 В, который длится 1 мкс. Импульс начинается с задержкой в 1 мкс в соответствии с настройкой опции Delay Time. Если ваш импульс выглядит иначе, измените параметры источника и повторите моделирование.

После проверки осциллограммы импульса входного напряжения необходимо проверить функционирование схемы и получить график. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis**.

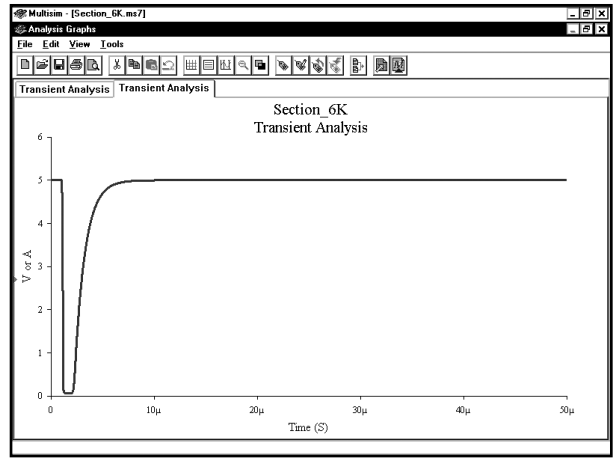
Настройки в вашем диалоговом окне должны выглядеть так, как показано ниже:



Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменную **$vout**:



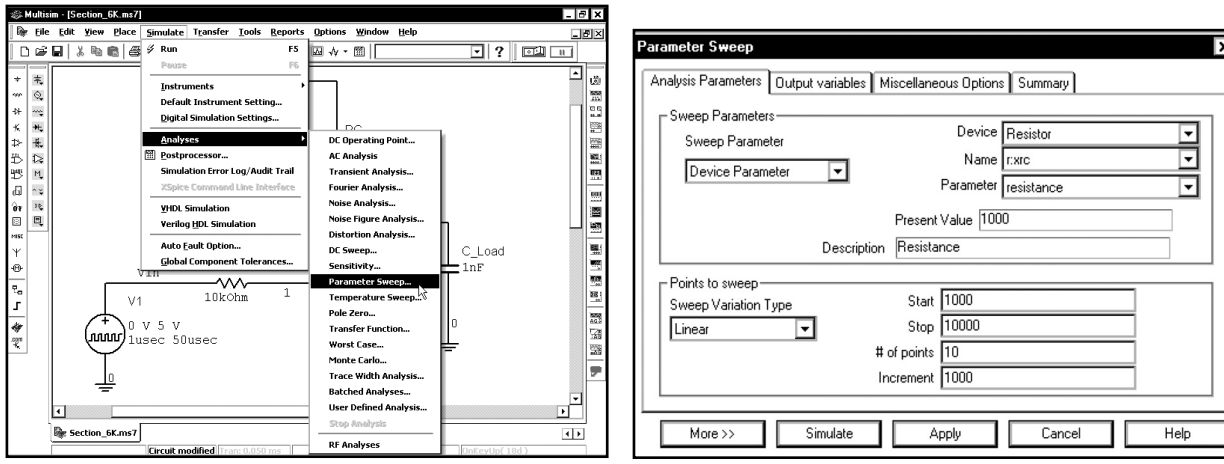
Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование и получить осциллограмму выходного напряжения:



Как видим, время спада импульса (от 5 до 0 В) очень короткое, но время нарастания импульса (от 0 до 5 В) велико.

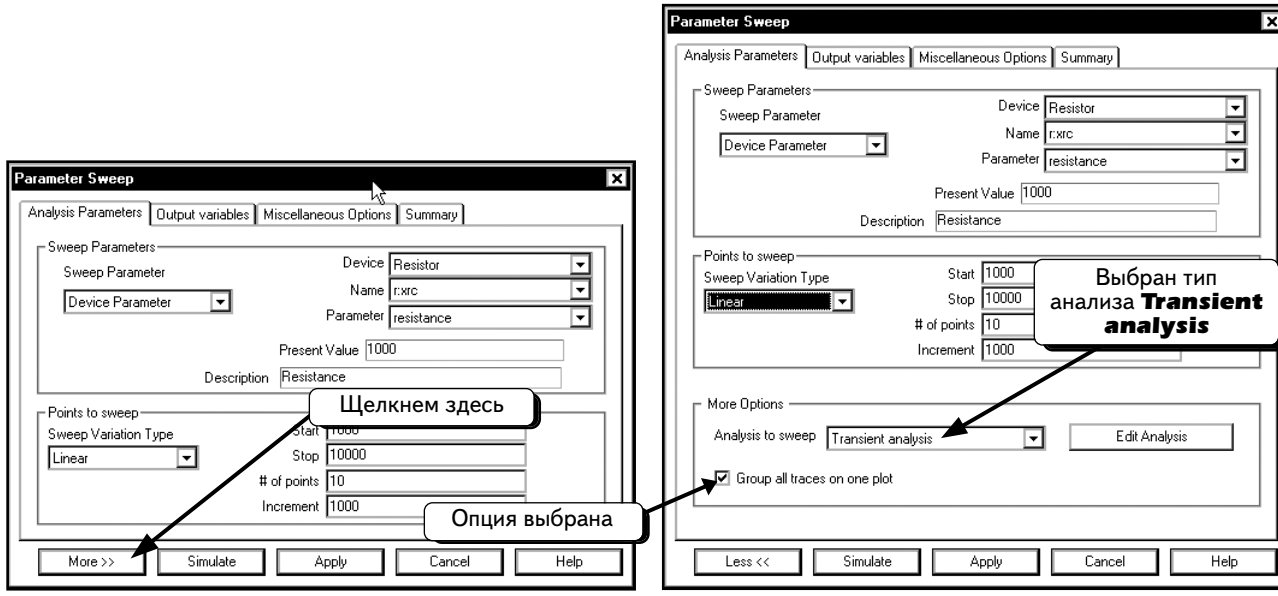
Определим теперь, как влияет напряжение резистора на время нарастания и спада импульса в схеме. Для этого воспользуемся функцией **Parameter Sweep**. Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Parameter Sweep**.

Введем данные в диалоговом окне, как показано ниже:



В верхней части диалогового окна указано, что будет изменяться сопротивление резистора RC. В нижней части диалогового окна приведены значения для резистора RC. В данном случае выбрано линейное изменение от 1000 до 10 000 Ом с шагом 1000 Ом. Таким образом, сопротивление RC будет иметь значения 1 000, 2 000, 3 000 Ом и так далее вплоть до 10 000 Ом.

Далее укажем, что функция Parameter Sweep будет работать вместе с анализом переходных процессов. Нажмем кнопку **More**:

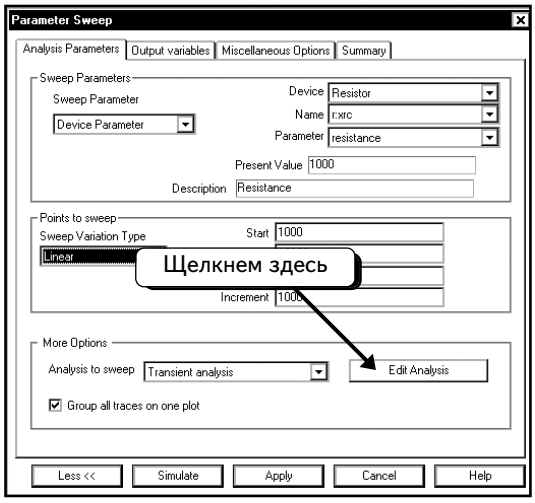


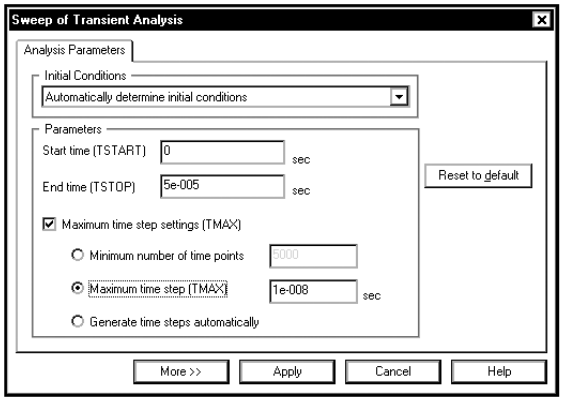
По умолчанию выбран анализ ***Transient Analysis***. Если у вас выбрана другая функция, выделите опцию Transient Analysis.

Отметим, что выбрана опция ***Group all traces on one plot*** **(Сгруппировать все кривые в одном графике)**. В результате все кривые, полученные с помощью функции Parameter Sweep, будут показаны на одном графике. В нашем примере сопротивление резистора имеет 10 разных значений. При отображении любой кривой на графике появятся все 10 кривых для 10 значений: при отображении кривой входного напряжения на графике появятся 10 кривых входного напряжения для различных значений резистора, при отображении кривой выходного напряжения 10 кривых выходного напряжения.

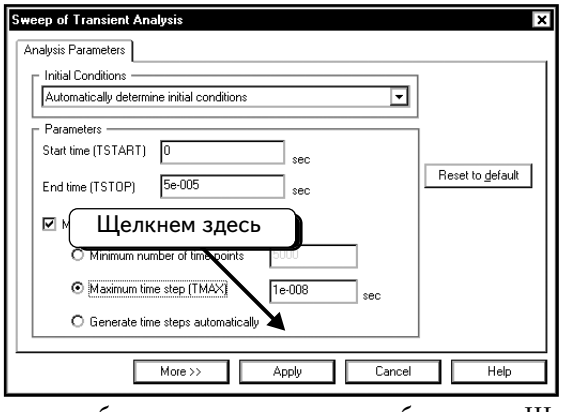
Далее надо отредактировать параметры анализа переходных процессов.

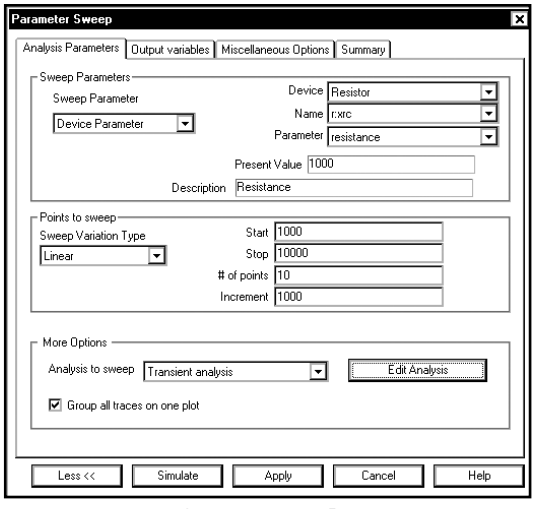
Нажмем кнопку **Edit Analysis** и введем настройки для значений, которыми мы пользовались в начале этого раздела:



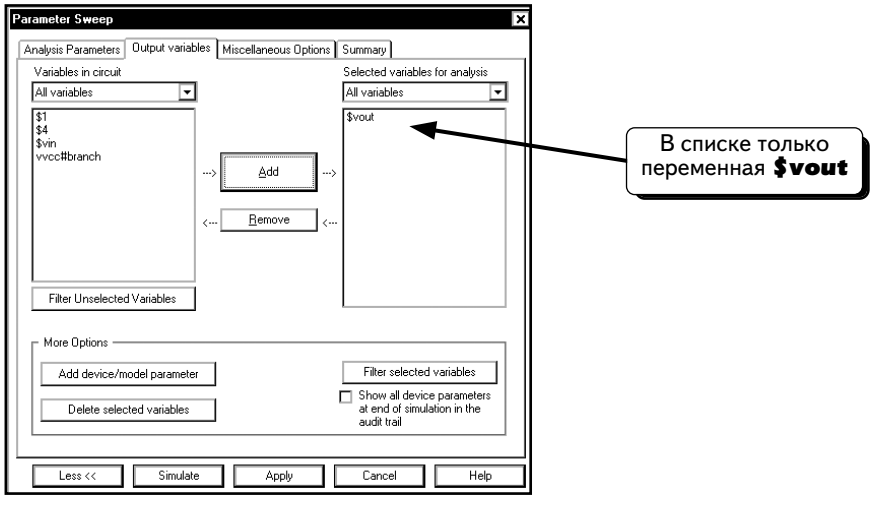


Нажмем кнопку **Apply**, чтобы вернуться в диалоговое окно **Parameter Sweep** Setup:

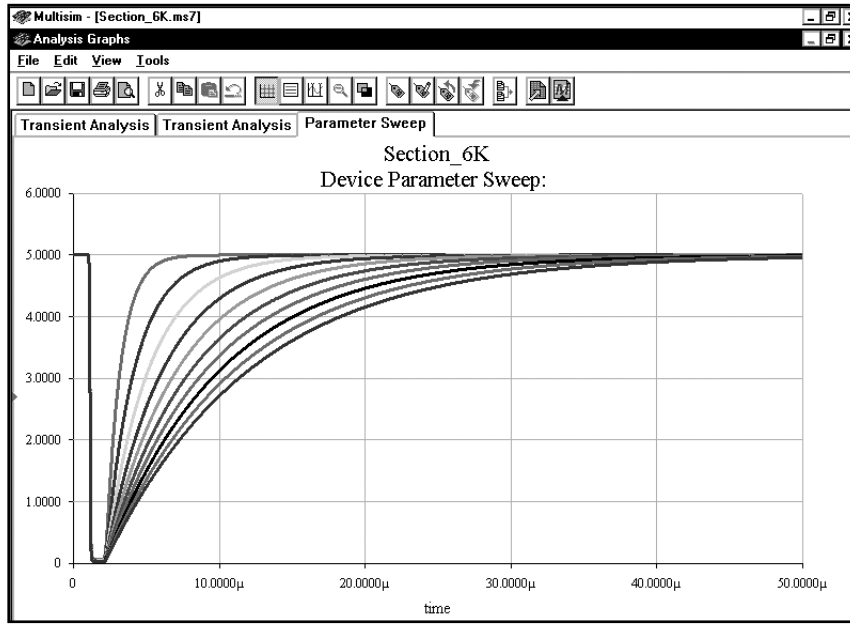




Наконец, выберем переменные для отображения. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменную **$vout**:

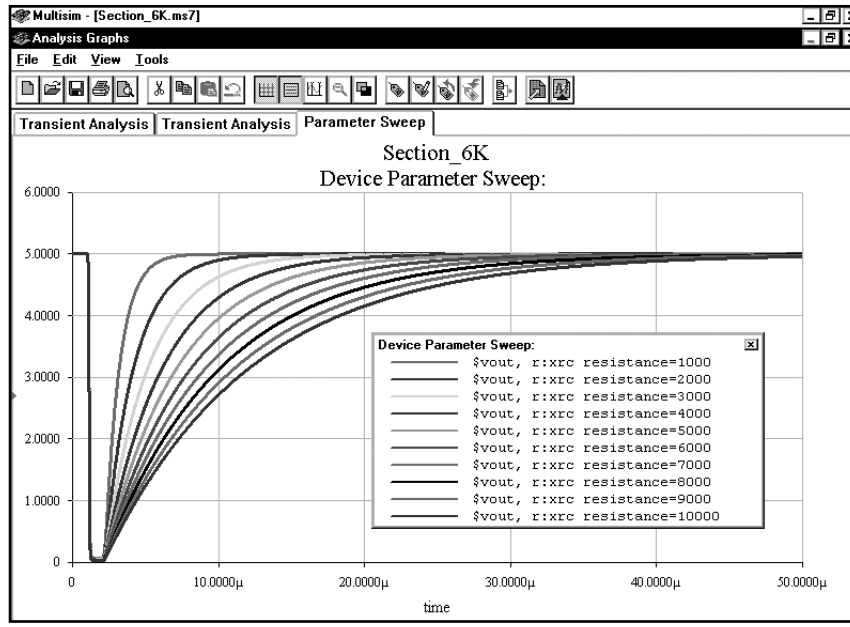


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:



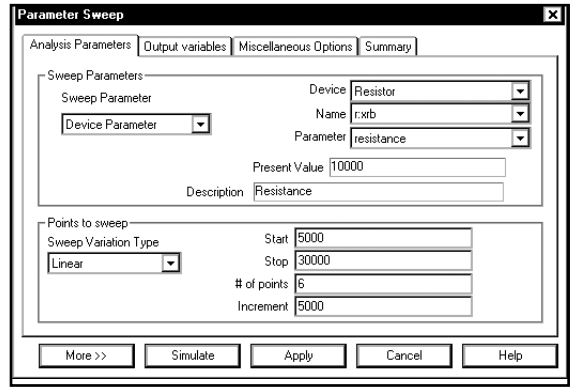
Видим, что изменение параметра RC никак не влияет на время спада. При текущей шкале времени все спады проходят от 5 до 0 В настолько быстро, что кривая выглядит, как прямая линия. Время нарастания импульса, напротив, напрямую зависит от величины сопротивления RC.

Вы можете спросить: а как определить, какая кривая соответствует определенному значению RC? Для этого необходимо отобразить легенду. Щелкнем по графику правой кнопкой мыши и выберем пункт меню **Toggle Legend**:



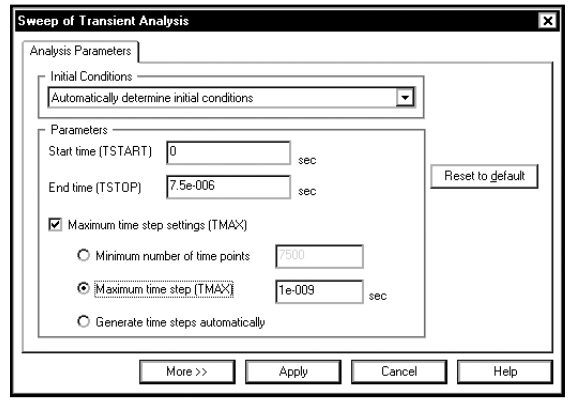
Используя легенду, можно идентифицировать каждую кривую. Как видим, при уменьшении значения RC время повышения импульса снижается. Таким образом, если необходимо обеспечить крутой фронт импульса, следует применять резисторы RC с малым сопротивлением.

УПРАЖНЕНИЕ 6-18: Создайте схему инвертора на биполярном транзисторе BJT, описанную в данном разделе. Покажите, как влияет сопротивление RB на скорость переключения. Значение RC постоянно и равно 1 кОм:

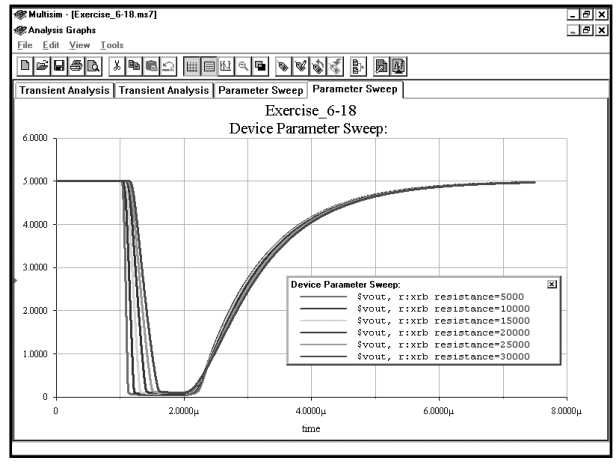


РЕШЕНИЕ: Измените настройки функции **Parameter Sweep**, чтобы изменять сопротивление резистора RB от 5 до 30 кОм с шагом в 5 кОм.

Настройте анализ переходных процессов на 7,5 мкс; введите для параметра ***Maximum step size*** значение 1 нс:



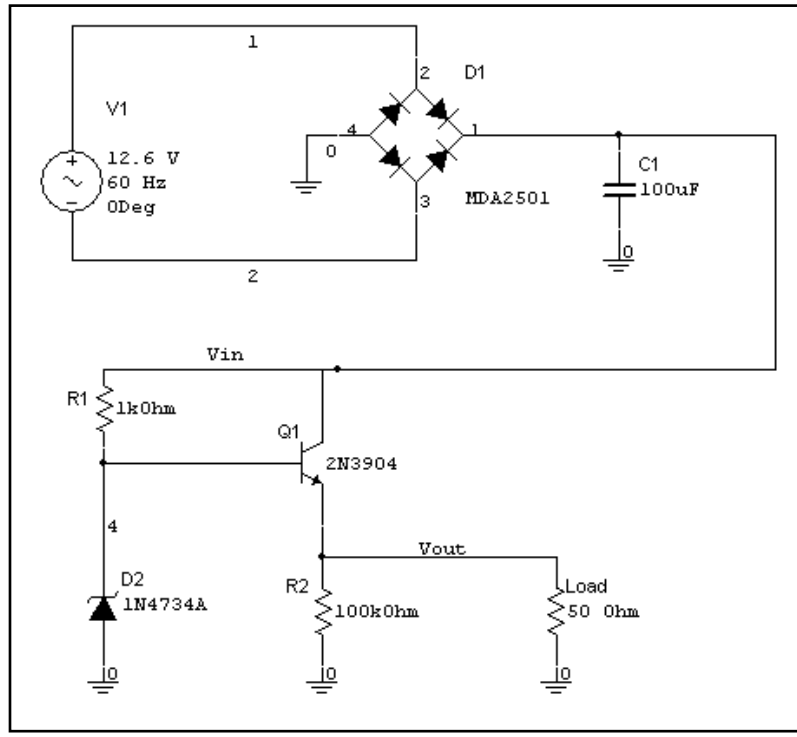
Результаты моделирования:



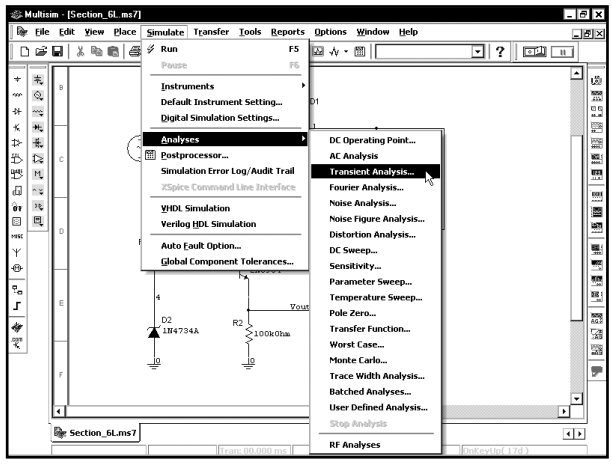
Результаты показывают, что сопротивление резистора в цепи базы влияет очень существенно на время спада и незначительно — на время нарастания.

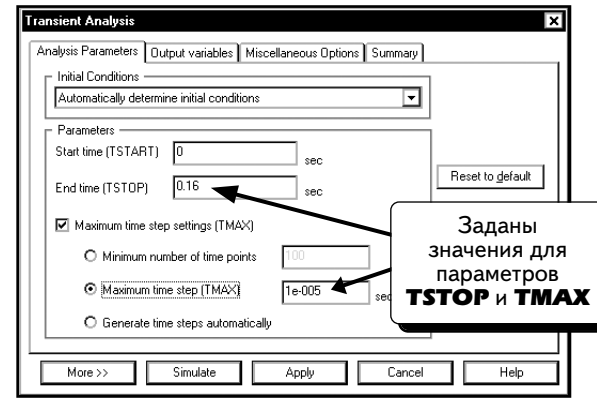
6.12. Вариация по температуре. Непрерывный стабилизатор

Можно использовать вариацию по температуре вместе с другими анализами. Таким образом, существует возможность выполнения анализа про различной температуре. В этом разделе будет показано, как температура влияет на свойства непрерывного стабилизатора напряжения. Создадим схему, показанную ниже:

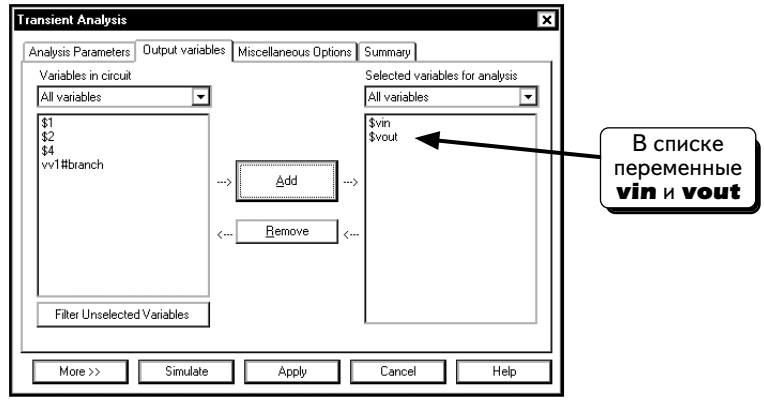


Источник напряжения **V1** моделирует действующее выходное напряжение трансформатора 12,6 В, подключенного к сети с действующим значением напряжения в 115 В. Данная схема представляет собой мостовой выпрямитель с фильтровым конденсатором на выходе, создающий пульсирующее постоянное напряжение на узле **Vin**. К этому узлу подключен непрерывный стабилизатор, состоящий из стабилитрона и биполярного NPN-транзистора. Этот стабилизатор создает выходное постоянное напряжение в 5 В. Выполним сначала анализ переходных процессов, чтобы проверить работу схемы при комнатной температуре (27 °C). Выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Transient Analysis** и изменим настройки:

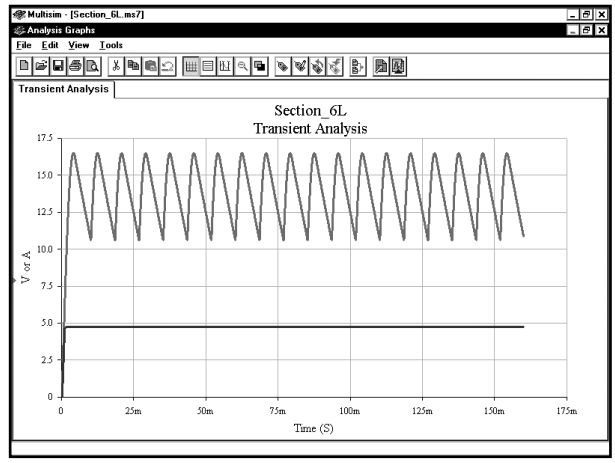




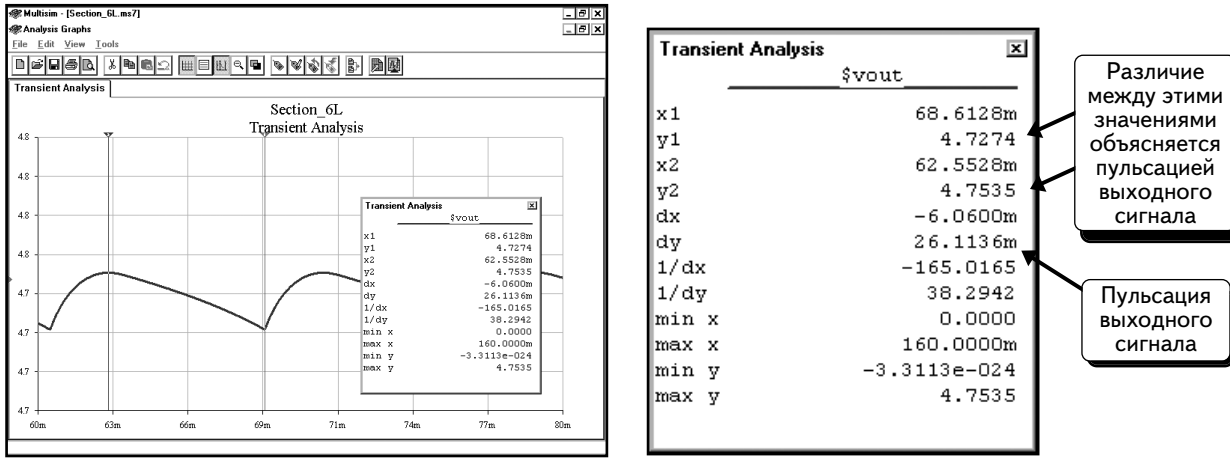
Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменные **$vin** и **$vout**:



Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование:



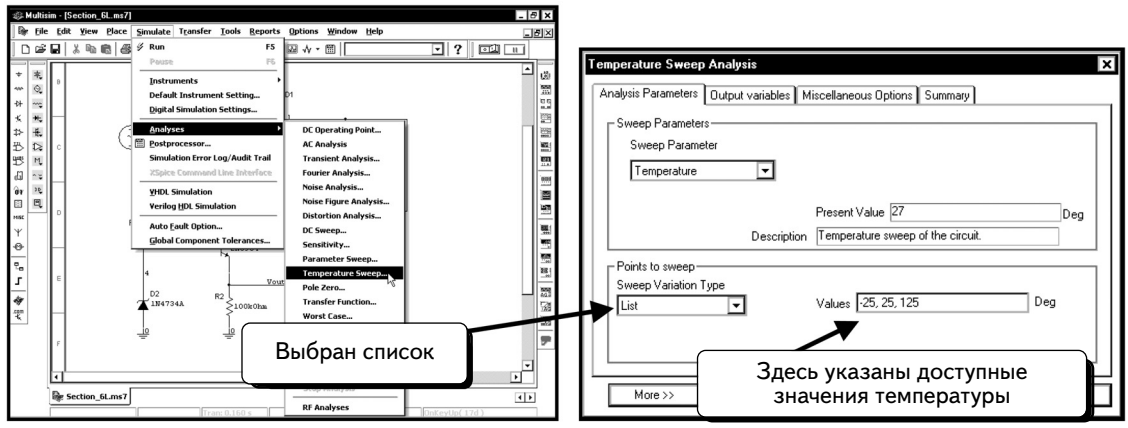
Увеличим масштаб кривой **vout**. Используя курсоры, определим амплитуду импульса:



Видим, что выходное напряжение составляет около 4,7 В, а амплитуда пульсаций на выходе — примерно 26 мВ.

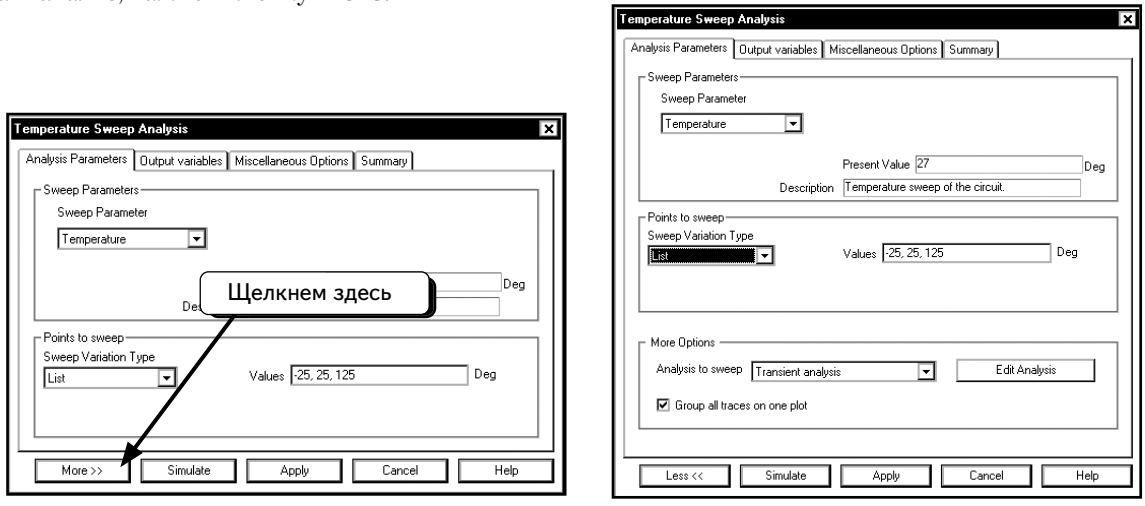
Далее покажем, как влияет температура на выходное напряжение. Выполним анализ переходных процессов при температурах: –25, +25 и +125 °C. Вернемся к схеме и выберем пункты меню **Simulate ⇒ Analyses ⇒ Temperature Sweep**;

изменим настройки в диалоговом окне ***Temperature Sweep Analysis***, как показано:

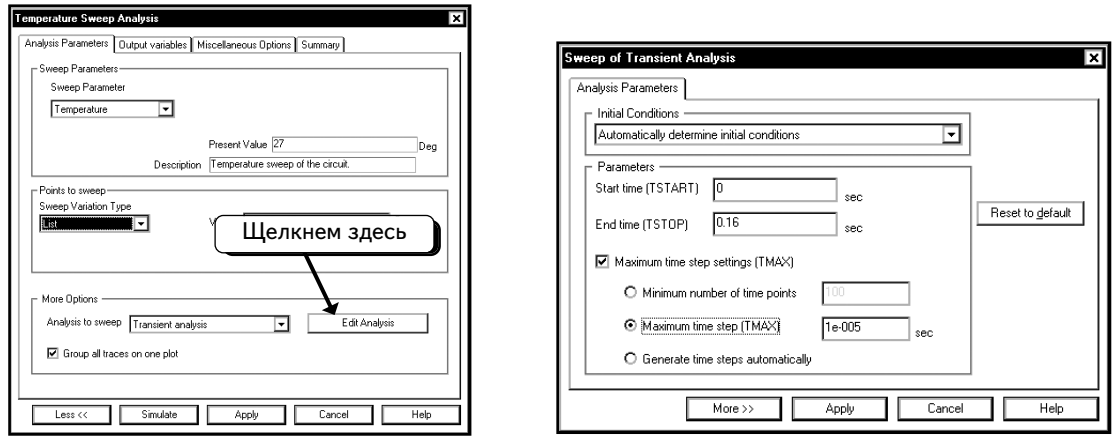


Как видим, для опции ***Sweep Variable Type*** **(Тип изменения переменной)** было выбрано значение ***List*** **(Список)**. Эта опция позволяет указать список различных значений температуры для моделирования. Определенная последовательность значений в списке необязательна.

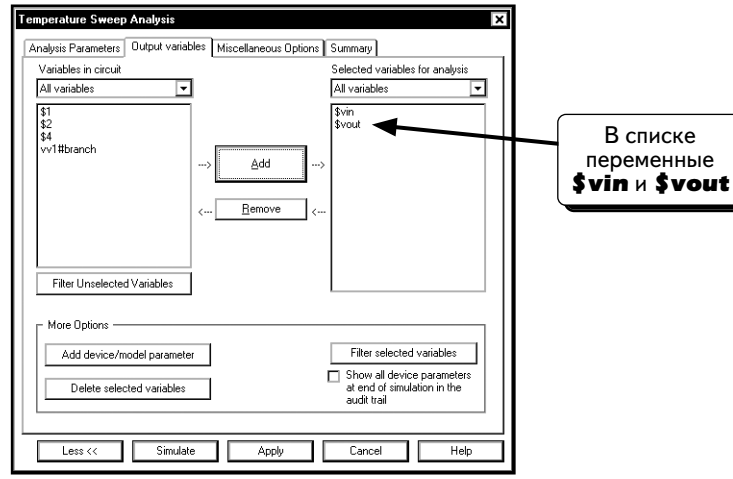
Функцией **Temperature Sweep Analysis** необходимо пользоваться вместе с другими функциями. Чтобы выбрать анализ, нажмем кнопку ***More***:



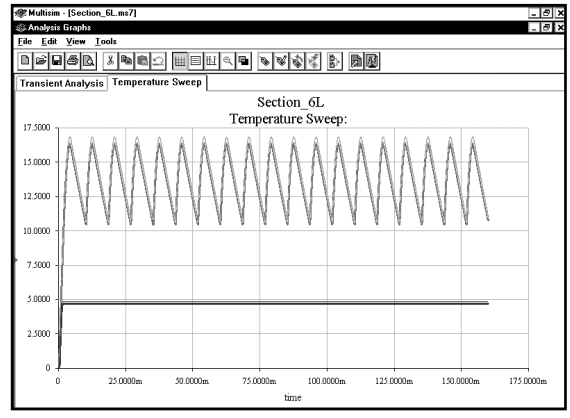
По умолчанию выбрана функция ***Transient analysis*** **(Анализ переходных процессов)**. По желанию можно выбрать анализ переменных составляющих или рабочей точки на постоянном токе. Настроим параметры анализа переходных процессов; нажмем кнопку ***Edit Analysis*** и введем значения, которые были использованы для анализа в начале раздела:



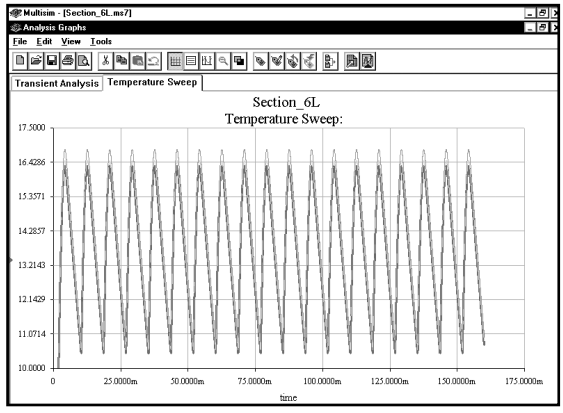
Нажмем кнопку **Apply**, чтобы вернуться в диалоговое окно **Temperature Sweep Analysis**. Щелкнем по вкладке **Output variables** и выделим переменные **$vin** и **$vout**:

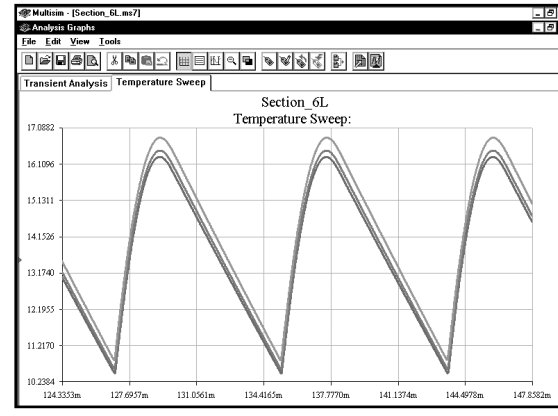


Нажмем кнопку **Simulate**, чтобы выполнить моделирование. Время сеанса втрое увеличится, по сравнению с временем предыдущего моделирования, так как анализ переходных процессов будет выполняться 3 раза подряд. Анализ переходных процессов проходит в рамках функции Temperature Sweep. В этом примере анализ переходных процессов поочередно выполняется при температурах: –25, +25 и +125 °C.



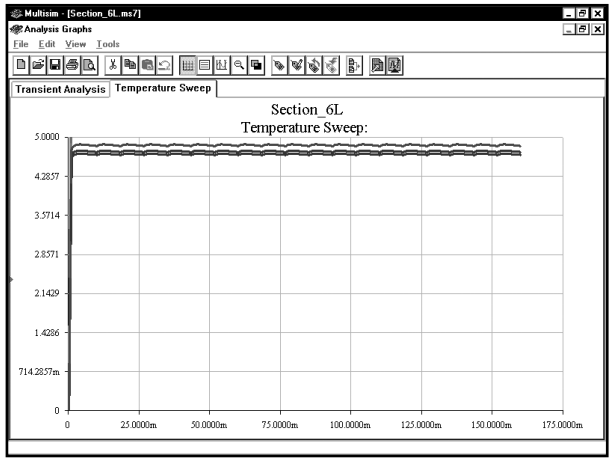
Кривые будут отображены для всех переменных — по одной кривой для каждого значения температуры. Результаты показывают, что температура влияет на осциллограммы входного и выходного напряжений. Сначала рассмотрим осциллограммы входного напряжения:

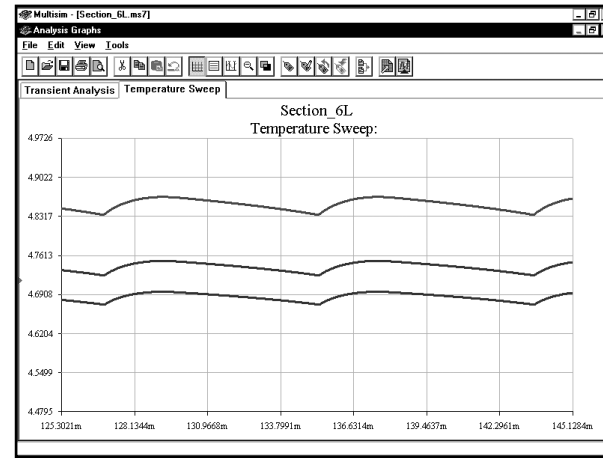




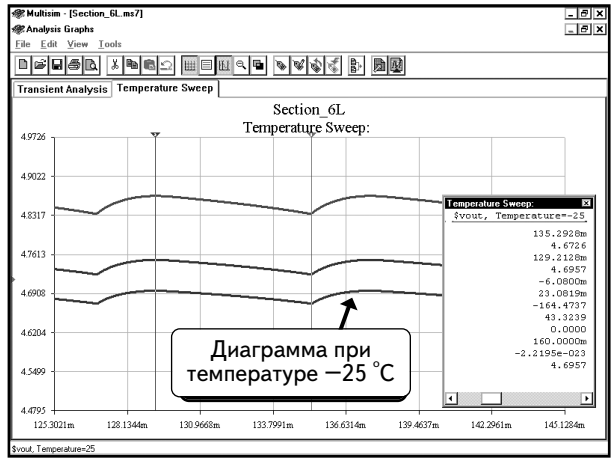
Изменения в осциллограмме входного напряжения вызваны, в основном, тем, что параметры диодов мостового выпрямителя зависят от температуры. Ток, потребляемый стабилизатором напряжения также зависит от температуры, что приводит к незначительному изменению нагрузки выпрямителя и к некоторому изменению входного напряжения, но этот эффект нельзя сравнивать с воздействием, вызванным диодами.

Далее рассмотрим осциллограммы выходного напряжения. Ниже показаны три кривые, соответствующие различным значениям температуры:

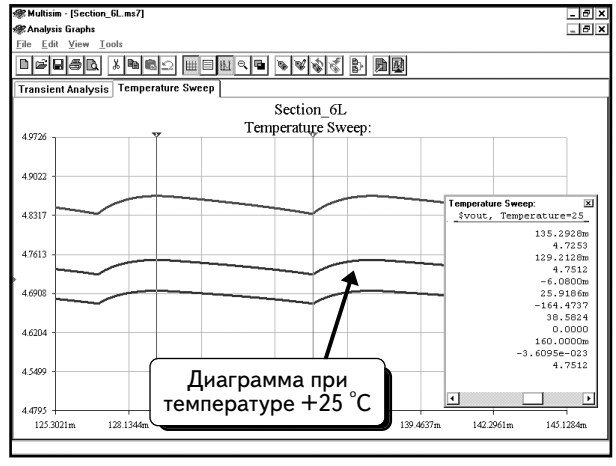




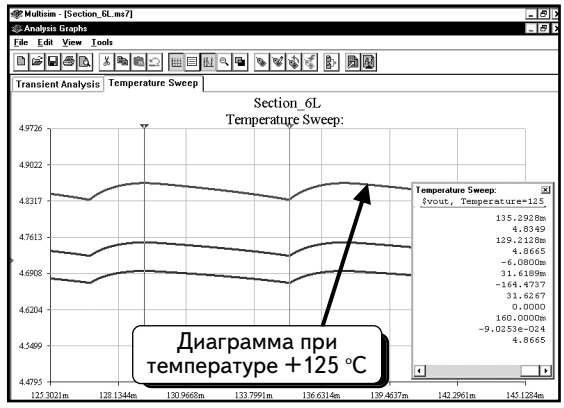
Используя курсоры, можно измерить пульсацию для каждой кривой:







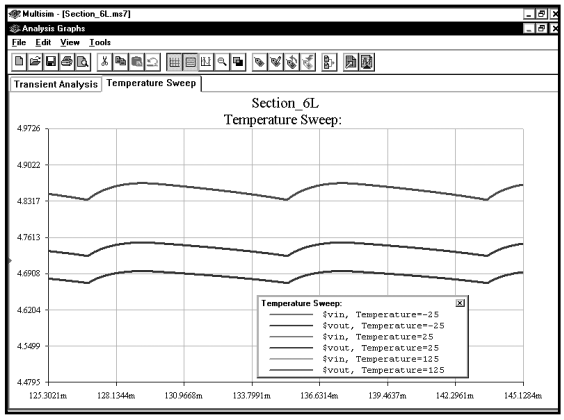


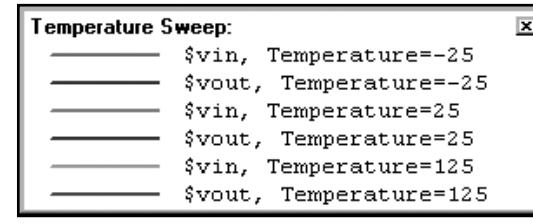




Размах пульсаций составляет: 31 мВ для верхней кривой, 26 — для средней и 23 — для нижней.

Может возникнуть вопрос: а как определить, какой температуре соответствует определенная кривая? Чтобы идентифицировать кривые, щелкнем по графику ***ПРАВОЙ*** кнопкой мыши и выберем пункт **Toggle Legend**:

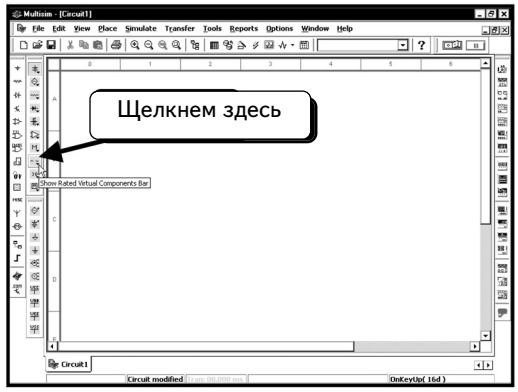


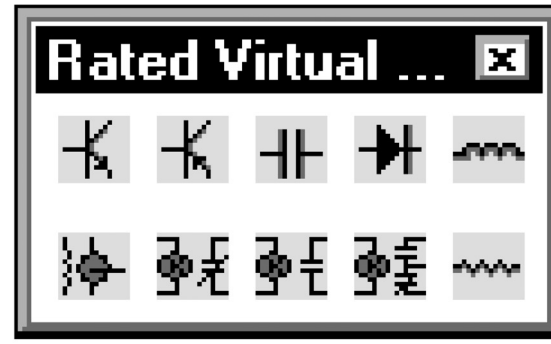


Легенда показывает, какому компоненту (**vin** или **vout**) и какому значению температуры соответствует каждая кривая.

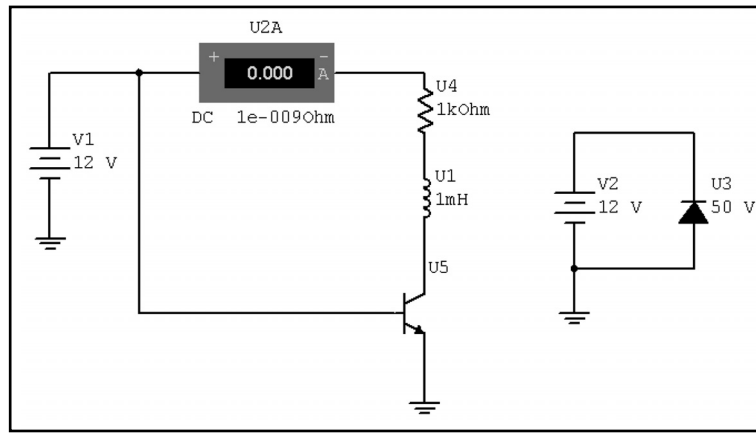
6.13. Компоненты с предельными параметрами

Программа Multisim 7 предлагает новую функцию — компоненты с предельными параметрами (rated components). Это значит, что можно вводить предельные параметры для определенных компонентов. Если во время моделирования параметры компонента превысили заданные пределы, система покажет, что данный компонент поврежден. В качестве примера можно привести ограничения по мощности резистора, напряжению на конденсаторе, обратному напряжению диода, напряжению база-эмиттер и максимальному коллекторному току для биполярного транзистора BJT. Чтобы показать работу данной функции на конкретном примере, введем в схему компонент с предельными параметрами. Для этого необходимо воспользоваться панелью **Rated Virtual Components (Виртуальные компоненты с предельными параметрами)**. Чтобы открыть эту панель, нажмем кнопку **Show Rated Virtual Components Bar** :

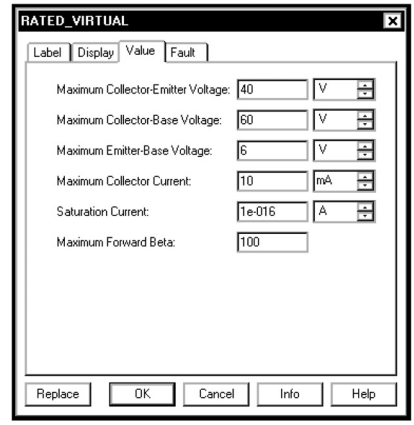




Создадим следующую схему:

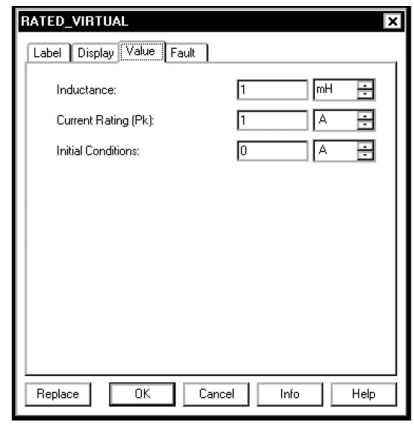


Все компоненты схемы, за исключением источника напряжения, индикатора тока и заземления, были взяты с панели Rated Virtual Components. Если дважды щелкнуть по транзистору BJT, то можно увидеть ограничения по значениям, которые немного изменены :



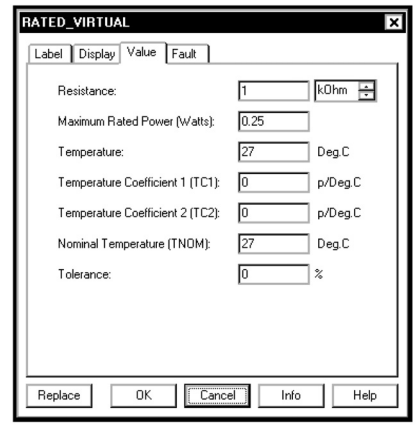
Для этого устройства используются ограничения: **Maximum Collector–Emitter Voltage (Максимальное напряжение коллектор-эмиттер),** равное **40** В, **Maximum Collector–Base Voltage (Максимальное напряжение коллектор-база)**, равное **60** В, **Maximum Emitter–Base Voltage (Максимальное напряжение эмиттер-база)**, равное **6** В, и **Maximum Collector Current (Максимальный ток коллектора)**, равный `10` **mA** (мА). Последнее значение изменено (по умолчанию — 200 мА). Внесем изменения в диалоговом окне и нажмем кнопку **OK**.

Дважды щелкнем по иконке катушки индуктивности, чтобы открыть список параметров:



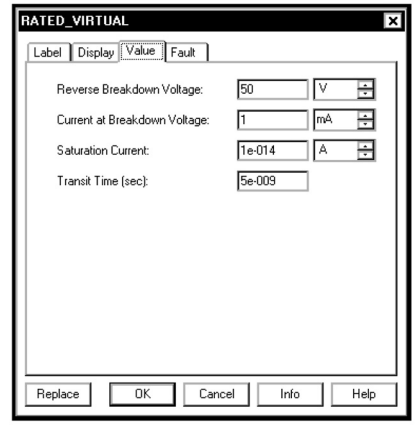
Единственное ограничение для катушки — это максимальный ток (по умолчанию задается значение 1 А). Изменим настройку на 10 мА и нажмем кнопку **OK**.

Дважды щелкнем по иконке резистора, чтобы открыть список параметров :



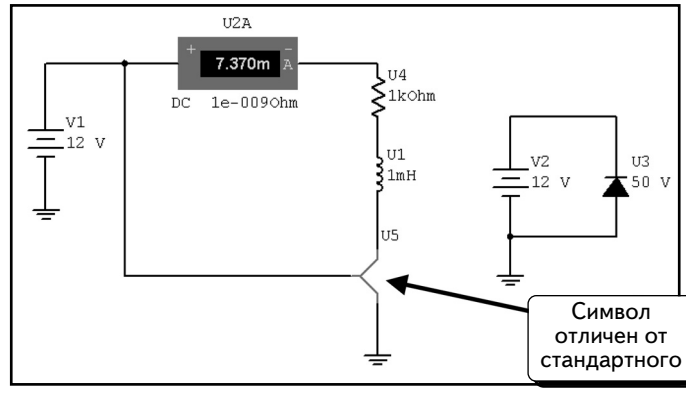
Для резисторов используется ограничение по мощности (по умолчанию — **0,25** Вт). Не будем здесь ничего изменять. Нажмем кнопку **Cancel**, чтобы вернуться к схеме.

Дважды щелкнем по иконке диода :



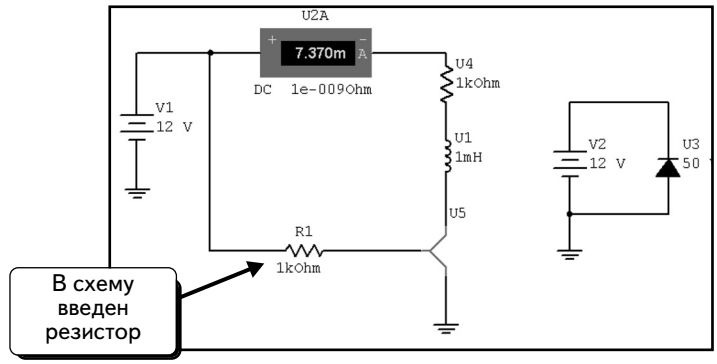
Для диодов используется ограничение по обратному пробивному напряжению (по умолчанию — 50 В). Другие параметры — это параметры модели диода. Если обратное напряжение превысит 50 В, в схеме будет отображено повреждение компонента. Не будем здесь ничего изменять. Нажмем кнопку **Cancel**, чтобы вернуться к схеме.

Нажмем клавишу F5, чтобы начать моделирование. Программа Multisim покажет, что транзистор BJT достиг ограничения и вышел из строя :

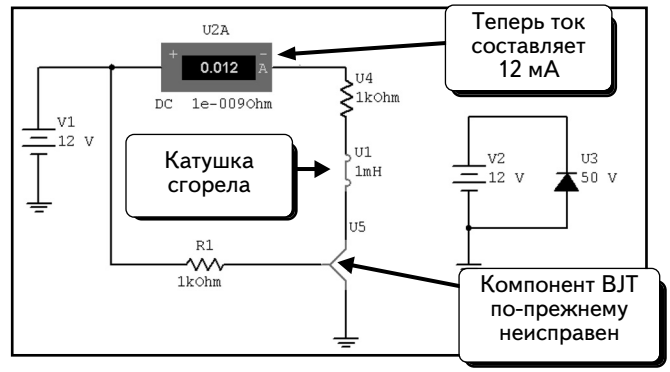


Обратите внимание: символ компонента BJT немного отличается и выделен красным цветом. Нажмем клавишу F5, чтобы остановить моделирование.

Теперь надо понять, почему транзистор BJT вышел из строя. На экране видно, что сила тока составляет 7,37 мА, а это намного меньше, чем ограничение по току (10 мА). При внимательном рассмотрении можно заметить, что был подключен источник напряжения 12 В непосредственно между базой и эмиттером транзистора, а это неправильно. Биполярный транзистор BJT управляется током, поэтому добавим в схему резистор 1 кОм, ограничивающий ток базы:

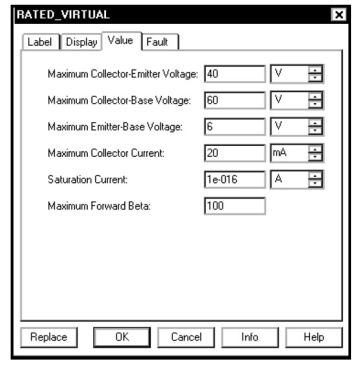


В данном случае резистор R1 не является компонентом с предельными параметрами; если было бы необходимо проверить работу компонента, можно было бы использовать компонент с предельными параметрами. Нажмем клавишу F5, чтобы повторить моделирование :

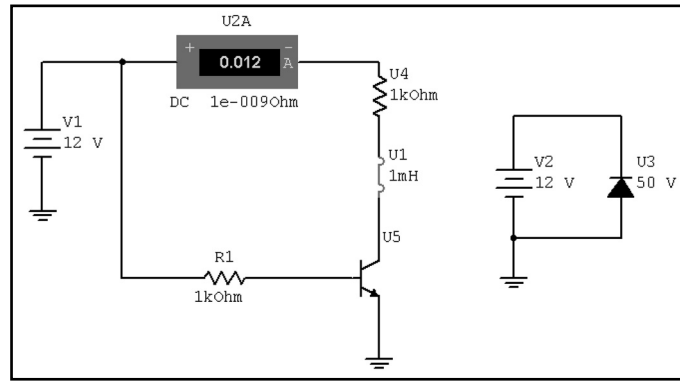


Компонент BJT по-прежнему неисправен, но по другой причине. Датчик тока показывает, что ток коллектора равен 12 мА, то есть он превышает предельно допустимое значение. Видим, что и катушка вышла из строя, так как было превышено максимально допустимое значение тока. Нажмем клавишу F5, чтобы остановить моделирование.

Надо изменить схему так, чтобы значение силы тока оказалось в допустимом диапазоне (не изменяя при этом компонент BJT) или увеличить предельное значение для компонента (то есть выбрать другой компонент с иным предельным значением). Пойдем по второму пути. Дважды щелкнем по иконке BJT и изменим значение параметра **Maximum Collector Current (Максимальный ток конденсатора)** на 20 мА :

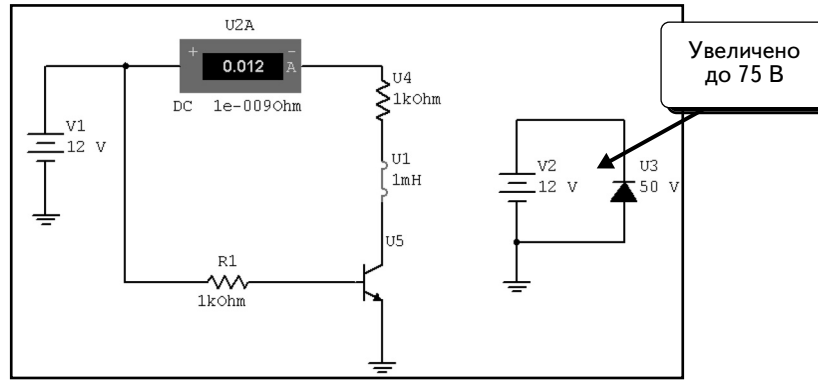


Нажмем кнопку **OK** и повторим моделирование :

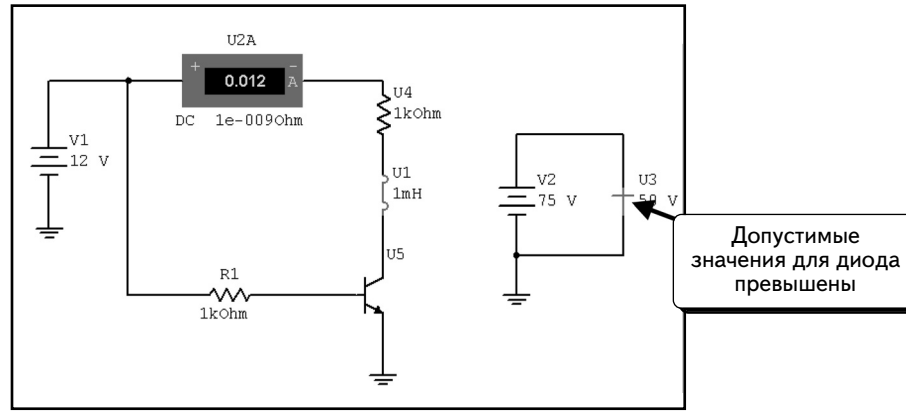


Теперь превышено только ограничение тока для катушки.

В последнем примере изменим напряжение источника V2 на 75 В. На экране видно, что было превышено ограничение по напряжению пробоя диода:



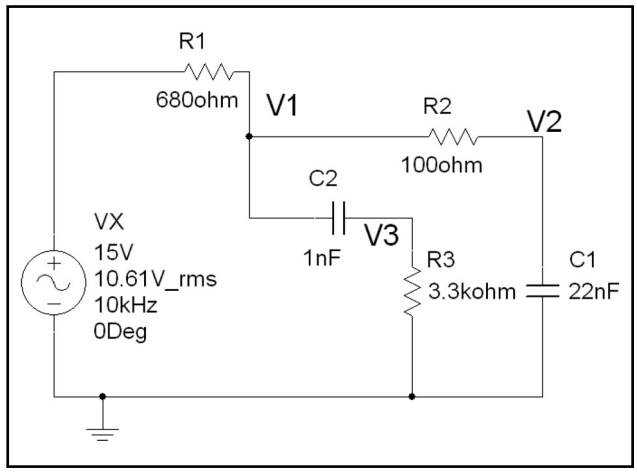
При выполнении моделирования диод выйдет из строя :



Эти простые схемы показывают, как работают компоненты с предельными параметрами при превышении ограничений. Обычно выполняется моделирование более сложных схем и проверяется работа компонентов в условиях, когда превышение ограничений далеко не так очевидно.

6.14. Задачи

Задача 6.1. Определите фазу напряжения на узле V1 (в градусах) с помощью осциллографа в данной схеме:



Задача 6.2. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V2 (в градусах) и ток через резистор R1.

Задача 6.3. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V3 (в градусах) и ток через конденсатор C2.

Задача 6.4. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на резисторе R1 (в градусах) и ток через конденсатор C2.

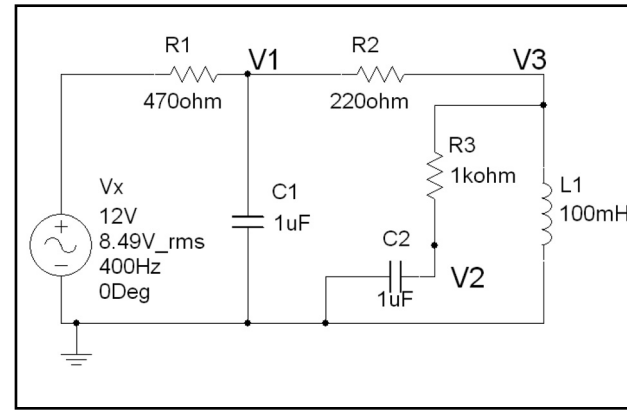
Задача 6.5. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V1 (в градусах) и ток через резистор R2.

Задача 6.6. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V2 (в градусах) и ток через конденсатор C1.

Задача 6.7. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V3 (в градусах) и ток через резистор R3.

Задача 6.8. В схеме из задачи 6.1 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на конденсаторе C2 (в градусах) и ток через конденсатор C2.

Задача 6.9. В данной схеме определите с помощью индикаторов фазу напряжения на узле V1 (в градусах).



Задача 6.10. В схеме из задачи 6.9 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V2 (в градусах) и ток через резистор R1.

Задача 6.11. В схеме из задачи 6.9 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V3 (в градусах) и ток через конденсатор C2.

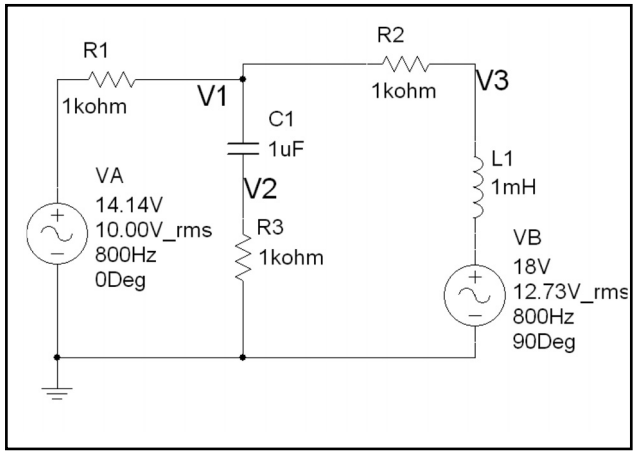
Задача 6.12. В схеме из задачи 6.9 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V1 (в градусах) и ток через резистор R2.

Задача 6.13. В схеме из задачи 6.9 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V2 (в градусах) и ток через конденсатор C1.

Задача 6.14. В схеме из задачи 6.9 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на конденсаторе C2 (в градусах) и ток через конденсатор C1.

Задача 6.15. В схеме из задачи 6.9 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V3 (в градусах) и ток через катушку индуктивности L1.

Задача 6.16. В данной схеме определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V1 (в градусах):



Задача 6.17. В схеме из задачи 6.16 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V2 (в градусах) и ток через резистор R1.

Задача 6.18. В схеме из задачи 6.16 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V3 (в градусах) и ток через конденсатор C1.

Задача 6.19. В схеме из задачи 6.16 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V1 (в градусах) и ток через резистор R2.

Задача 6.20. В схеме из задачи 6.16 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на катушке индуктивности L1 (в градусах) и ток через резистор R2.

Задача 6.21. В схеме из задачи 6.16 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V2 (в градусах) и ток через конденсатор C1.

Задача 6.22. В схеме из задачи 6.16 определите с помощью осциллографа фазу напряжения на узле V3 (в градусах) и ток через катушку индуктивности L1.

Задача 6.23. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout, если увеличить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 353)?

Задача 6.24. Как изменяться напряжения на узлах Vin и Vout, если уменьшить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 353)? При каком наименьшем значении для компонента C1 выходное напряжение будет сохраняться неизменным?

Задача 6.25. Как изменятся токи через диоды, если увеличить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 353)?

Задача 6.26. Как изменятся токи через диоды, если уменьшить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 353)?

Задача 6.27. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout , если уменьшить нагрузку, то есть повысить сопротивление (см. схему на с. 353)?

Задача 6.28. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout, если увеличить нагрузку, то есть уменьшить сопротивление (см. схему на с. 353)? При какой наибольшей нагрузке выходное напряжение будет сохраняться неизменным?

Задача 6.29. Как изменятся токи через диоды, если уменьшить нагрузку, то есть повысить сопротивление (см. схему на с. 353)?

Задача 6.30. Как изменятся токи через диоды, если увеличить нагрузку, то есть уменьшить сопротивление (см. схему на с. 353)?

Задача 6.31. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout, если увеличить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 362)?

Задача 6.32. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout, если уменьшить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 362)? При каком наименьшем значении для емкости C1 выходное напряжение будет сохраняться неизменным?

Задача 6.33. Как изменятся токи через диоды, если увеличить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 362)?

Задача 6.34. Как изменятся токи через диоды, если уменьшить емкость конденсатора C1 (см. схему на с. 362)?

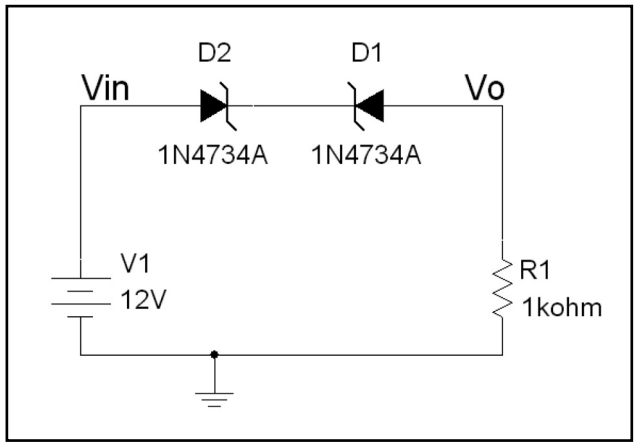
Задача 6.35. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout, если уменьшить нагрузку, то есть повысить сопротивление (см. схему на с. 362)?

Задача 6.36. Как изменятся напряжения на узлах Vin и Vout, если увеличить нагрузку, то есть уменьшить сопротивление (см. схему на с. 362)? При какой наибольшей нагрузке выходное напряжение будет сохраняться неизменным?

Задача 6.37. Как изменятся токи через диоды, если уменьшить нагрузку, то есть повысить сопротивление (см. схему на с. 362)?

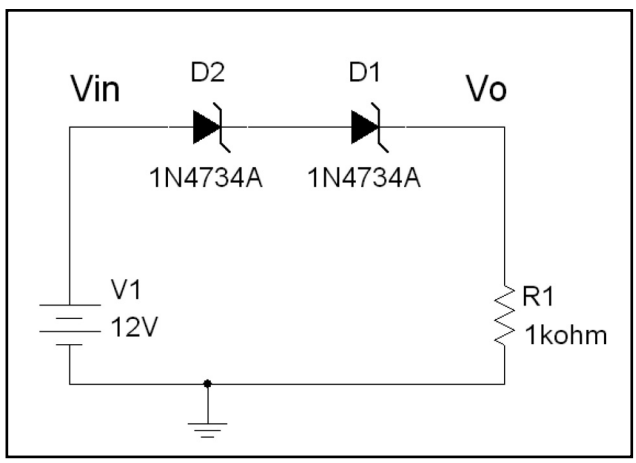
Задача 6.38. Как изменятся токи через диоды, если увеличить нагрузку, то есть уменьшить сопротивление (см. схему на с. 362)?

Задача 6.39. В данной схеме напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Используя анализ переходных процессов, получите временные диаграммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения. Получите переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.



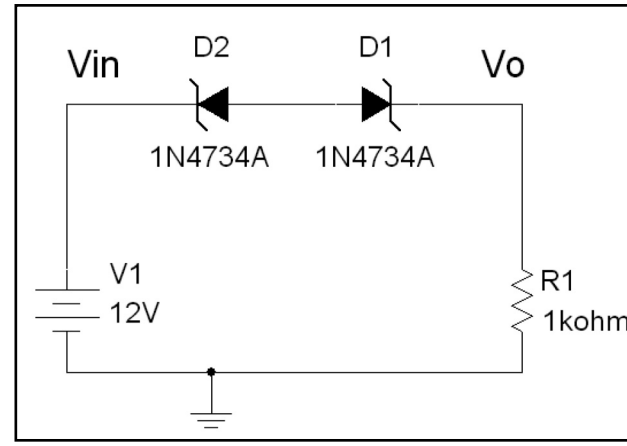
Задача 6.40. В схеме из задачи 6.39 напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Получите осциллограммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.

Задача 6.41. В данной схеме напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Используя анализ переходных процессов, получите временные диаграммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения, а также с помощью осциллографа получите переходную характеристику Vo(Vin).



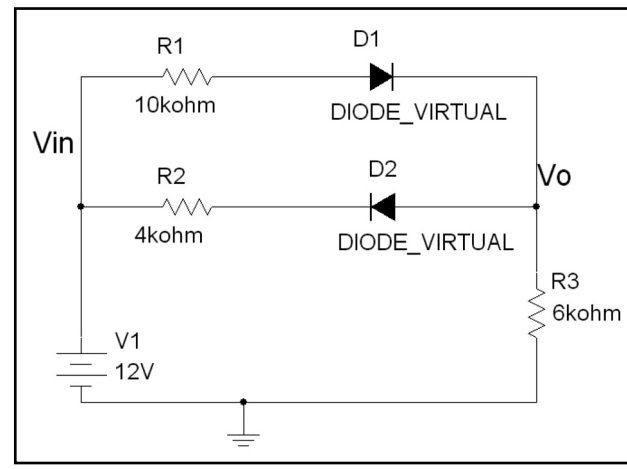
Задача 6.42. В схеме из задачи 6.41 напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Получите осциллограммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.

Задача 6.43. В данной схеме напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Используя анализ переходных процессов, получите временные диаграммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения. Получите переходную характеристику Vo (Vin) с помощью осциллографа.



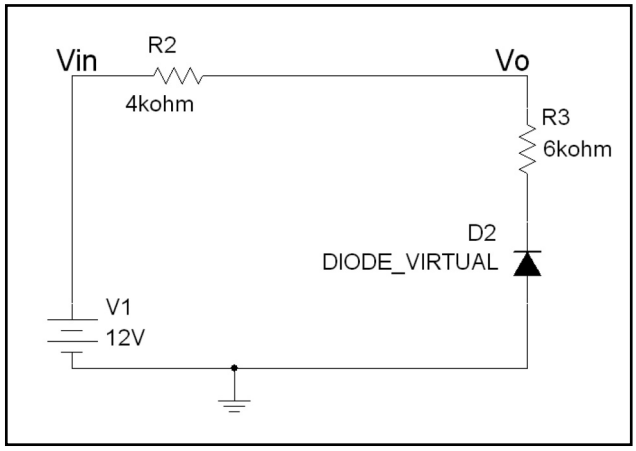
Задача 6.44. В схеме из задачи 6.43 напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Получите осциллограммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo (Vin) с помощью осциллографа.

Задача 6.45. В данной схеме напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Используя анализ переходных процессов, получите временные диаграммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.



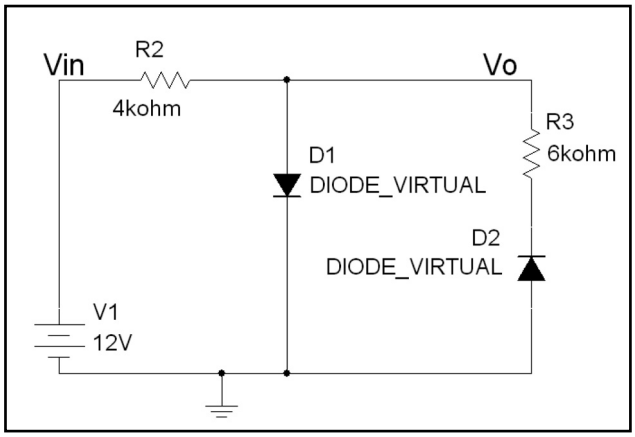
Задача 6.46. В схеме из задачи 6.45 напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Получите осциллограммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.

Задача 6.47. В данной схеме напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Используя анализ переходных процессов, получите временные диаграммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.



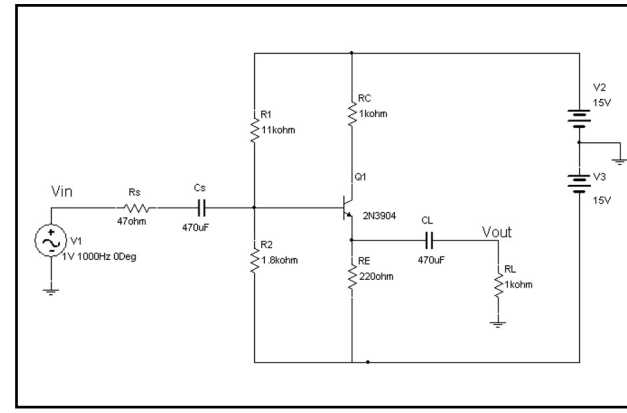
Задача 6.48. В схеме из задачи 6.47 напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Получите осциллограммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.

Задача 6.49. В данной схеме напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Используя анализ переходных процессов, получите временные диаграммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.



Задача 6.50. В схеме из задачи 6.49 напряжение Vin имеет треугольную форму с размахом от –20 до +20 В. Получите осциллограммы Vo(t) и Vin(t) для одного периода входного напряжения и переходную характеристику Vo(Vin) с помощью осциллографа.

Задача 6.51. В данной схеме напряжение Vin имеет форму синусоиды с частотой 1000 Гц. Определите максимальный размах напряжения Vout при отсутствии больших искажений. Рассчитайте амплитуду Vin и Vout для максимального размаха напряжения. Выполните анализ Фурье для максимального размаха напряжения. Определите коэффициент гармоник (THD) выходного сигнала. Какова амплитуда наибольшей гармоники?



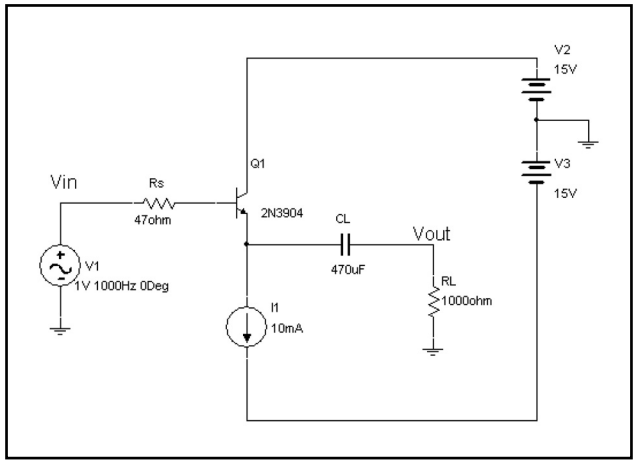
Задача 6.52. Повторите анализ задачи 6.51 при RL = 10 кОм.

Задача 6.53. Повторите анализ задачи 6.51 при RL = 100 Ом.

Задача 6.54. Повторите анализ задачи 6.51 при RL = 10 Ом.

Задача 6.55. Повторите анализ задачи 6.51 при RC = 0 Ом. В чем заключается влияние сопротивления RC на процессы в схеме?

Задача 6.56. В данной схеме напряжение Vin имеет форму синусоиды с частотой 1000 Гц. Определите максимальный размах напряжения Vout при отсутствии больших искажений. Рассчитайте амплитуду Vin и Vout для максимального размаха напряжения. Выполните анализ Фурье для максимального размаха напряжения. Определите коэффициент гармоник (THD) выходного сигнала. Какова амплитуда наибольшей гармоники?

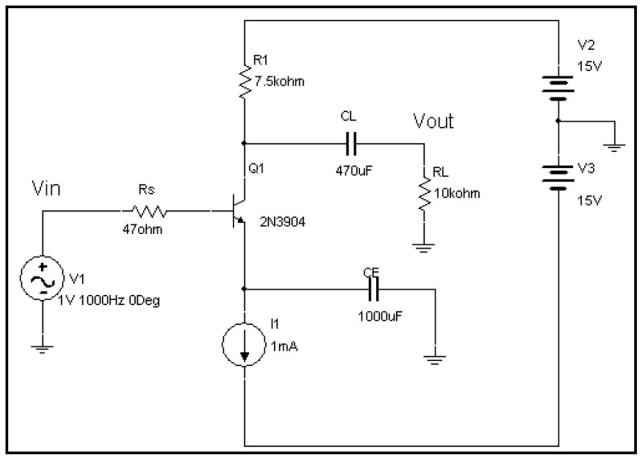


Задача 6.57. Повторите анализ задачи 6.56 при RL = 10 кОм.

Задача 6.58. Повторите анализ задачи 6.56 при RL = 100 Ом.

Задача 6.59. Повторите анализ задачи 6.56 при RL = 10 Ом.

Задача 6.60. В данной схеме напряжение Vin имеет форму синусоиды с частотой 1000 Гц. Определите максимальный размах напряжения Vout при отсутствии больших искажений. Рассчитайте амплитуду Vin и Vout для максимального размаха напряжения. Выполните анализ Фурье для максимального размаха напряжения. Определите коэффициент гармоник (THD) выходного сигнала. Какова амплитуда наибольшей гармоники?

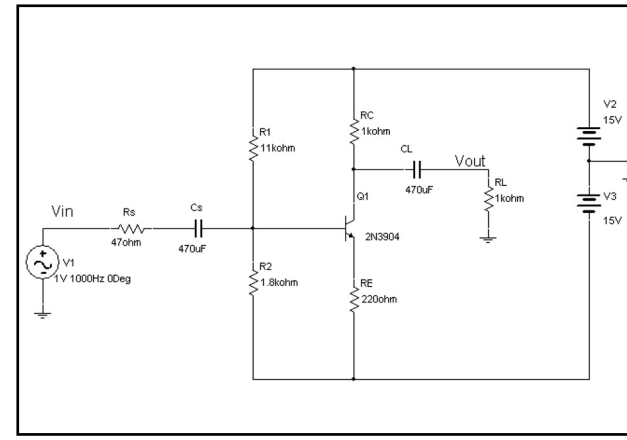


Задача 6.61. Повторите анализ задачи 6.60 при RL = 1 кОм.

Задача 6.62. Повторите анализ задачи 6.60 при RL = 100 Ом.

Задача 6.63. Повторите анализ задачи 6.60 при RL = 10 Ом.

Задача 6.64. В данной схеме напряжение Vin имеет форму синусоиды с частотой 1000 Гц. Определите максимальный размах напряжения Vout при отсутствии больших искажений. Рассчитайте амплитуду Vin и Vout для максимального размаха напряжения. Выполните анализ Фурье для максимального размаха напряжения. Определите коэффициент гармоник (THD) выходного сигнала. Какова амплитуда наибольшей гармоники?

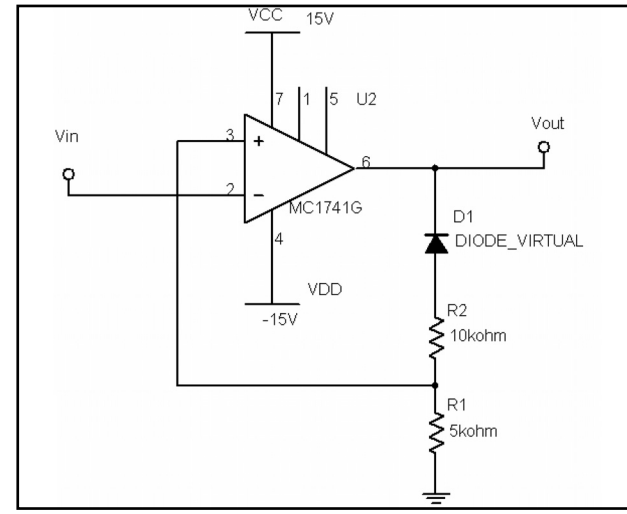


Задача 6.65. Повторите анализ задачи 6.64 при RL = 10 кОм.

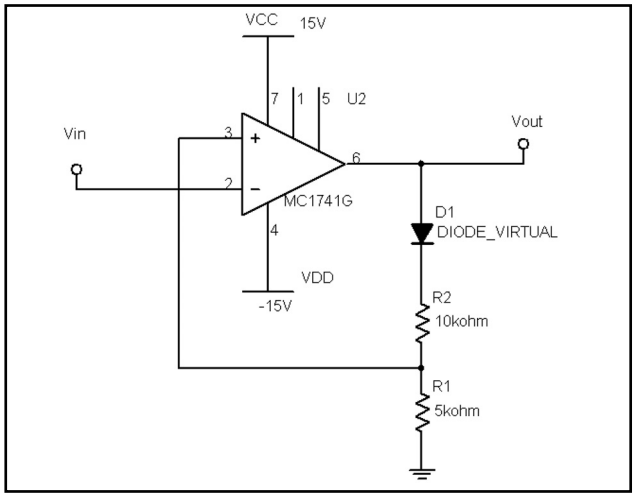
Задача 6.66. Повторите анализ задачи 6.64 при RL = 100 Ом.

Задача 6.67. Повторите анализ задачи 6.64 при RL = 10 Ом.

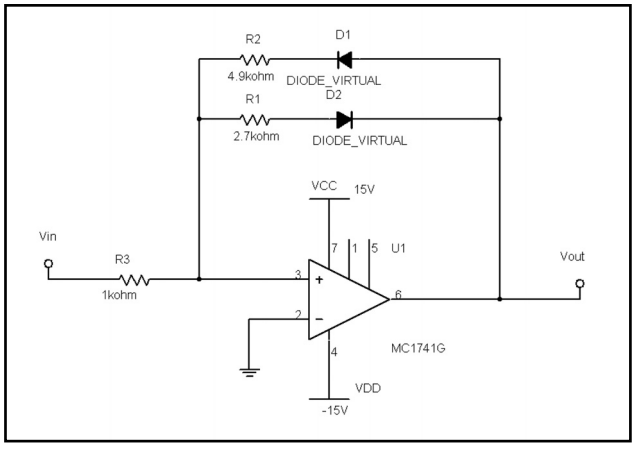
Задача 6.68. Получите переходную характеристику для триггера Шмитта, собранного по данной схеме:



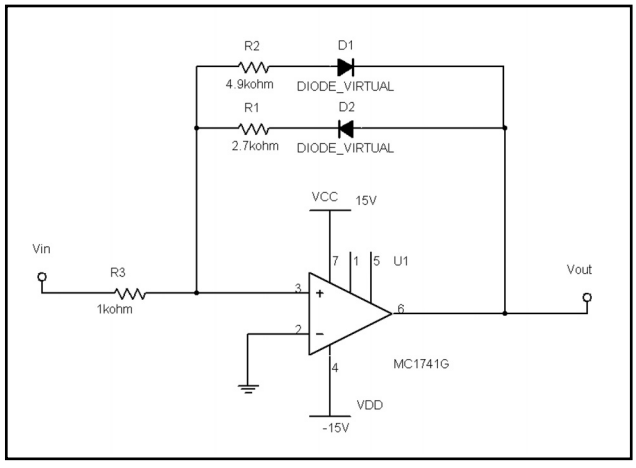
Задача 6.69. Получите переходную характеристику для триггера Шмитта, собранного по данной схеме:



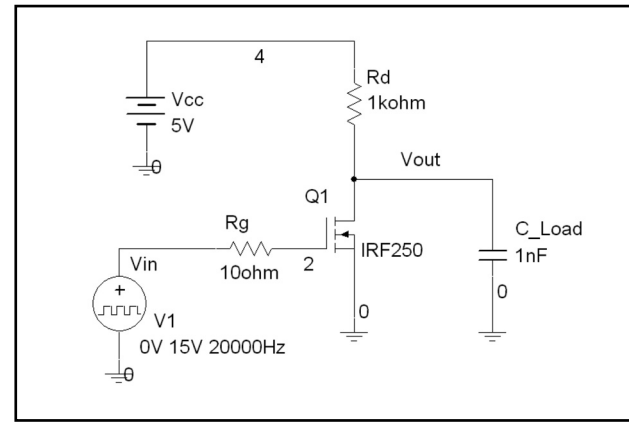
Задача 6.70. Получите переходную характеристику для триггера Шмитта, собранного по данной схеме:



Задача 6.71. Получите переходную характеристику для триггера Шмитта, собранного по данной схеме:



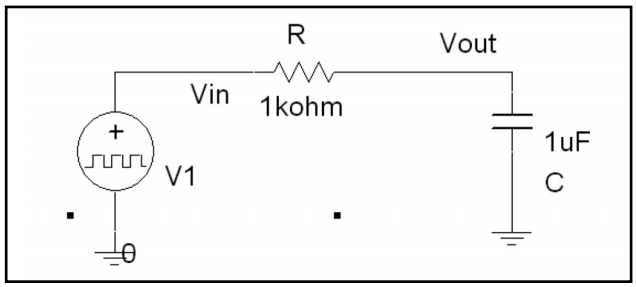
Задача 6.72. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления Rd от 1 до 10 кОм (с шагом 1 кОм) влияет на время нарастания и спада для выходного напряжения в данной схеме:



Задача 6.73. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления Rg от 10 до 100 Ом (с шагом 10 Ом) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в схеме из задачи 6.72. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как описанное изменение влияет на напряжение «затвор-исток» полевого транзистора MOSFET.

Задача 6.74. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления Rg от 100 до 500 Ом (с шагом 100 Ом) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в данной схеме из задачи 6.72. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как описанное изменение влияет на напряжение «затвор-исток» полевого транзистора MOSFET.

Задача 6.75. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления R от 1 до 10 кОм (с шагом 1 кОм) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в данной схеме:

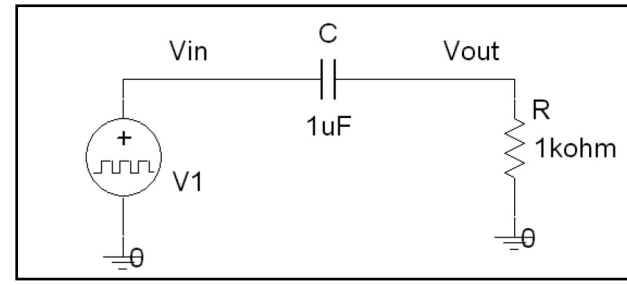


Напряжение V1 имеет прямоугольную форму с размахом от 0 до 15 В. Вы должны правильно выбрать настройки источника импульсного напряжения, чтобы выходной конденсатор успевал полностью заряжаться и разряжаться.

Задача 6.76. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления R от 100 Ом до 1 кОм (с шагом 100 Ом) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в схеме из задачи 6.75. Напряжение V1 имеет прямоугольную форму с размахом от 0 до 15 В. Вы должны правильно выбрать настройки источника импульсного напряжения, чтобы выходной конденсатор успевал полностью заряжаться и разряжаться.

Задача 6.77. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение емкости C от 1 мкФ до 10 мкФ (с шагом 1 мкФ) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в схеме из задачи 6.75. Напряжение V1 имеет прямоугольную форму с размахом от 0 до 15 В. Вы должны правильно выбрать настройки источника импульсного напряжения, чтобы выходной конденсатор успевал полностью заряжаться и разряжаться.

Задача 6.78. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления R от 1 до 10 кОм (с шагом 1 кОм) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в схеме. Напряжение V1 имеет прямоугольную форму с размахом от 0 до 15 В. Вы должны правильно выбрать настройки источника импульсного напряжения, чтобы конденсатор C успевал полностью перезаряжаться.



Задача 6.79. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение сопротивления R от 100 Ом до 1 кОм (с шагом 100 Ом) влияет на время нарастания и спада для осциллограммы выходного напряжения в схеме из задачи 6.78. Напряжение V1 имеет прямоугольную форму с размахом от 0 до 15 В. Вы должны правильно выбрать настройки источника импульсного напряжения, чтобы конденсатор C успевал полностью перезаряжаться.

Задача 6.80. Воспользуйтесь функцией Parameter Sweep и анализом переходных процессов, чтобы определить, как изменение значения C от 1 мкФ до 10 мкФ (с шагом 1 мкФ) влияет на время нарастания и спада выходного напряжения в схеме из задачи 6.78. Напряжение V1 имеет прямоугольную форму с размахом от 0 до 15 В. Вы должны правильно выбрать настройки источника импульсного напряжения, чтобы конденсатор C успевал полностью перезаряжаться.

Задача 6.81. В схеме непрерывного стабилизатора (см. раздел 6.12) была применена функция Temperature Sweep, чтобы определить, как температурная зависимость полупроводниковых приборов влияет на выходное напряжение стабилизатора. В этой задаче будем учитывать еще и температурную зависимость резисторов R1 и R2. Можно учесть температурную зависимость только для виртуального резистора. Отличие виртуального резистора от стандартного в том, что сопротивление виртуального может изменяться, а значение стандартного резистора установлено заранее и не может быть изменено. Резисторы R1 и R2 должны быть виртуальными. Если дважды щелкнуть по иконке резистора, то можно увидеть параметры TC1 и TC2, которые являются температурными коэффициентами сопротивления. Сопротивление при определенной температуре RT определяется по формуле:

$$R_T = \mathbf{R}[1 + \mathbf{TC1}(T - Tnom) + \mathbf{TC2}(T - Tnom)^2],$$

где Tnom — это номинальная температура модели и по умолчанию она равна 27 °C; R — сопротивление резистора при номинальной температуре; TC1 и TC2 — линейный и квадратичный температурный коэффициенты. Если не указать значения параметров TC1 и TC2, они будут равны нулю, и температурная зависимость учитываться не будет.

Стандартный резистор имеет линейную зависимость от температуры (TC1 = 100e-6, TC2 = 0). Учтите температурную зависимость сопротивлений R1 и R2, а затем проведите моделирование по методике из раздела 6.12.

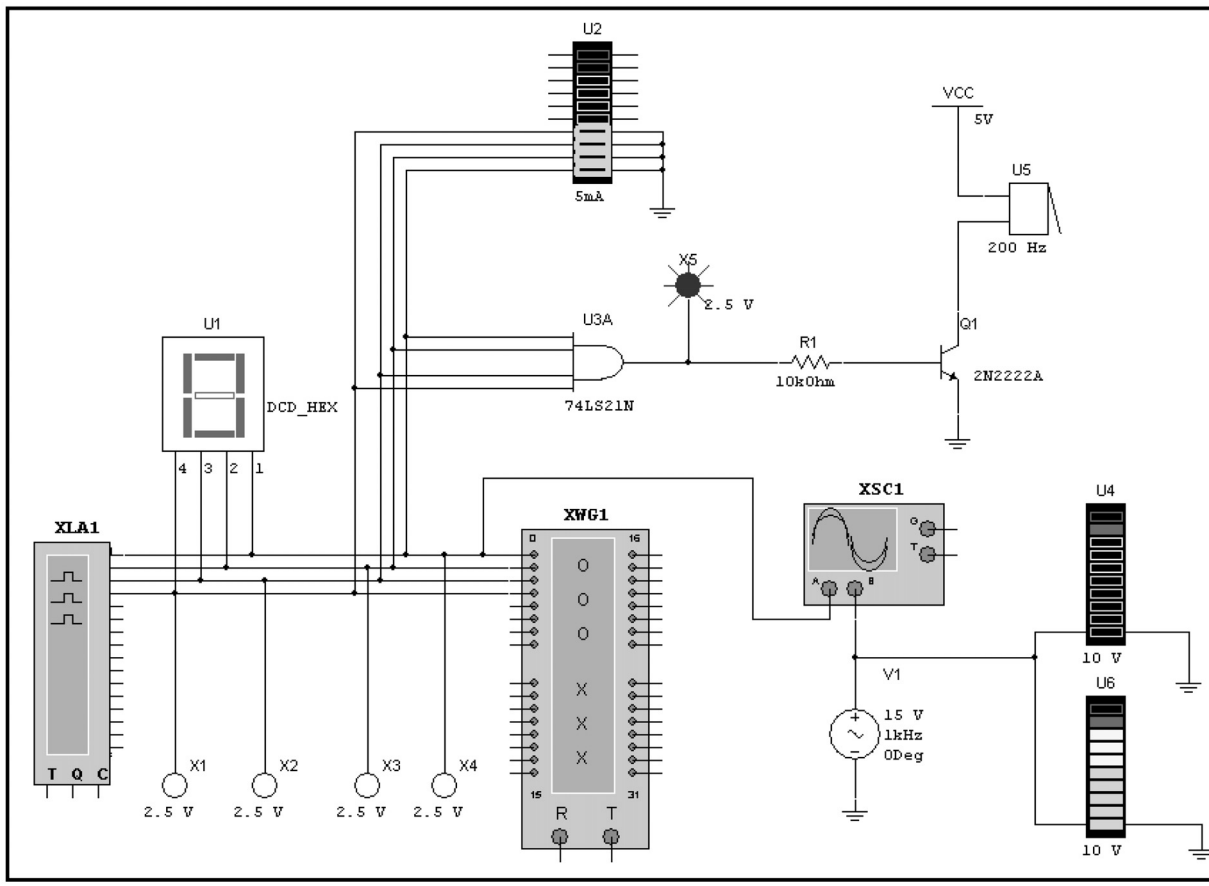
ГЛАВА 7
Цифровое моделирование

Программа Multisim может моделировать аналоговые, аналогово-цифровые и цифровые схемы, а также обладает функциями VHDL. В этом разделе будет показано, как выполнять цифровое и аналогово-цифровое моделирование. Примеры схем достаточно просты, но их можно использовать и при работе с более сложными схемами, применяя анализ переходных процессов или работая в виртуальной лаборатории.

Предполагается, что разделы 1 и 2, в которых рассказывается, как рисовать схемы и работать с программой Postprocessor, уже были изучены, а также выполнен ряд задач из других разделов, освоена работа с осциллографом и есть умение добавлять в схему большинство компонентов.

7.1. Цифровые индикаторы, генераторы сигнала и инструменты

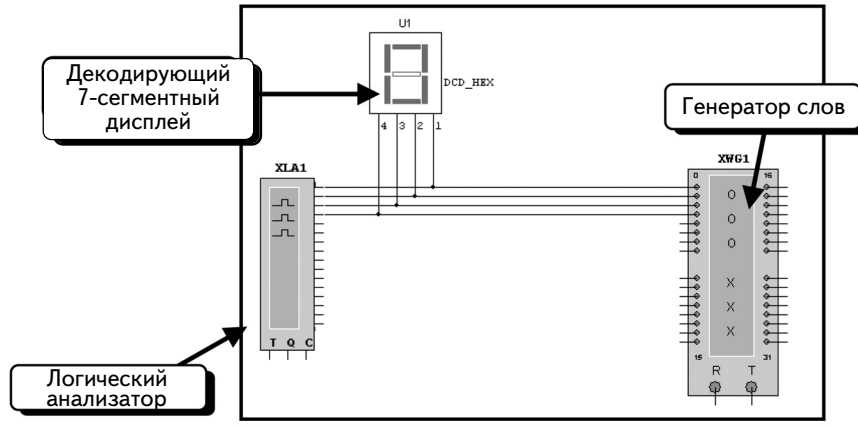
Чтобы продемонстрировать работу с различными инструментами и индикаторами цифровых моделей, проведем анализ данной схемы:



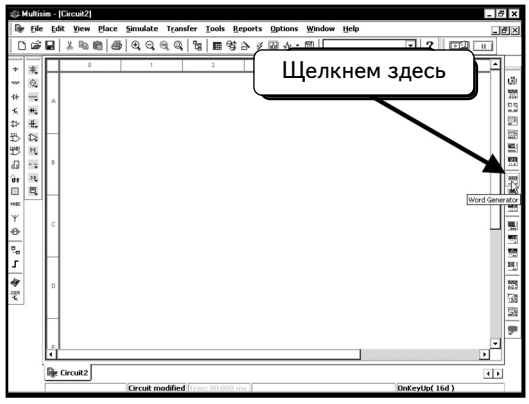
Это довольно большая схема, поэтому будем создавать ее постепенно, проводя подробный анализ после каждого шага. Схема содержит инструменты Word Generator, Logic Analyzer и Oscilloscope, индикаторы, зуммер (buzzer), логический элемент и несколько диаграмм. С помощью данных компонентов будем моделировать и изучать поведение цифровых схем.

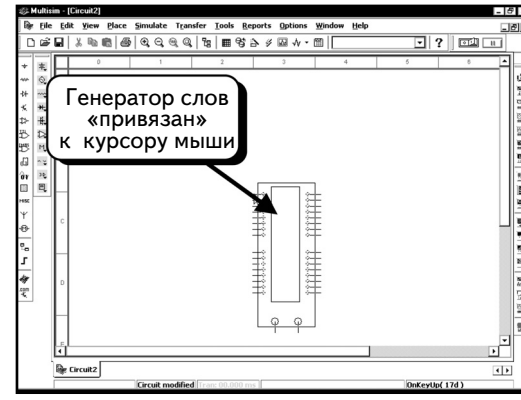
7.1.1. Инструменты Word Generator и Logic Analyzer

Сначала сформируем часть данной схемы:

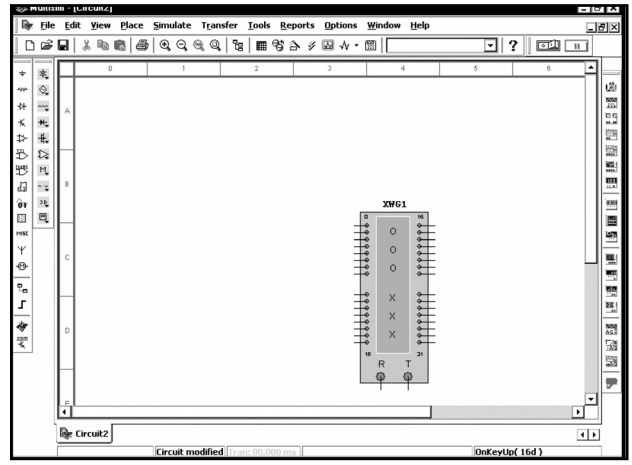


Инструменты **Word Generator** и **Logic Analyzer** находятся на панели инструментов **Instruments**. Чтобы добавить инструмент **Word Generator**, щелкнем кнопку ***Word Generator*** . Инструмент будет «привязан» к курсору мыши:

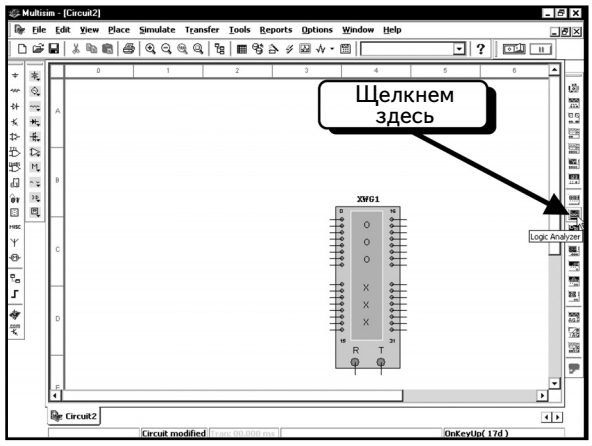


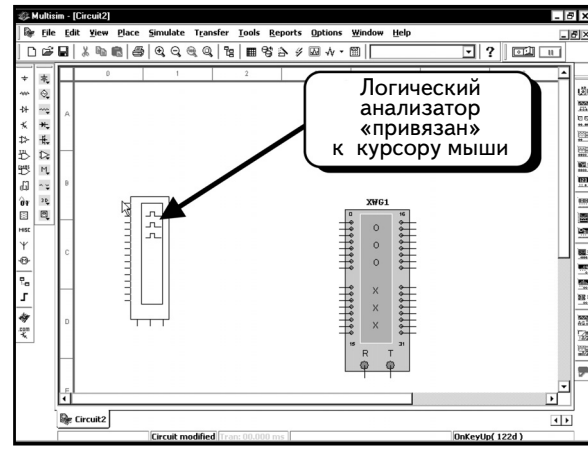


Переместим курсор мыши в нужное положение и щелкнем ***ЛЕВОЙ*** кнопкой мыши, добавив компонент в схему:

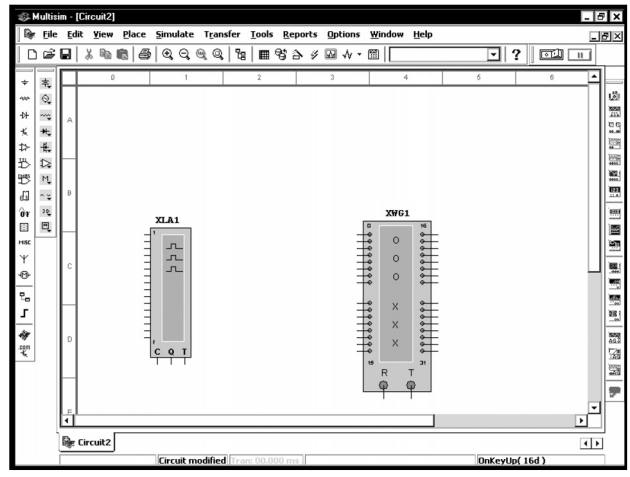


Чтобы добавить инструмент ***Logic Analyzer***, щелкнем кнопку ***Logic Analyzer*** . Инструмент также будет «привязан» к курсору мыши:

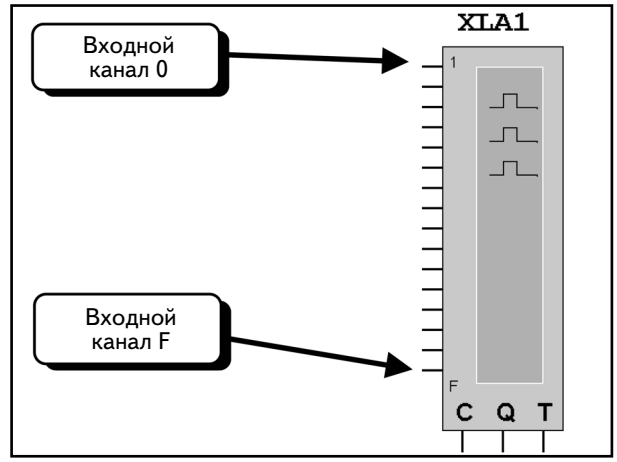




Добавим компонент в схему:

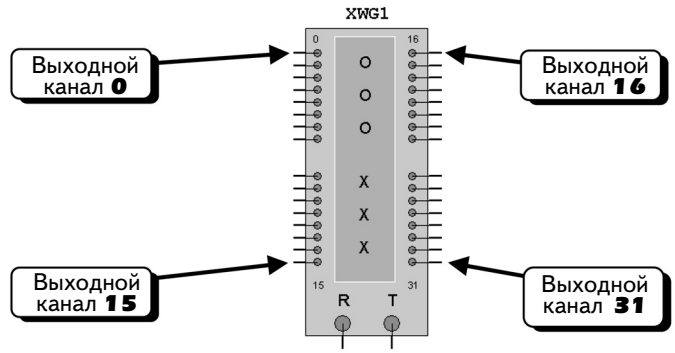


Рассмотрим более внимательно условные изображения инструментов **Logic Analyzer** и **Word Generator**. Изображение инструмента **Logic Analyzer** показано ниже:



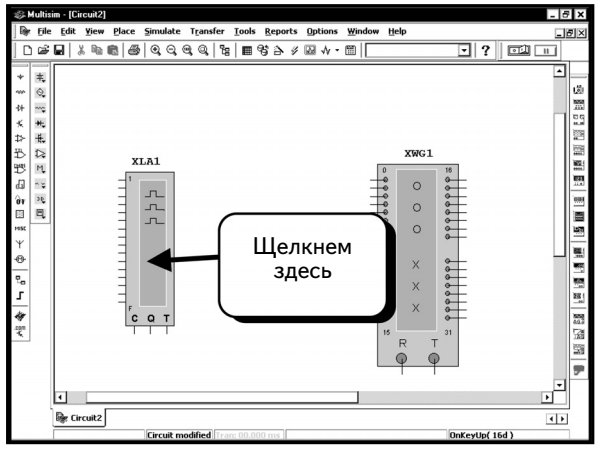
Он имеет 16 входов, помеченных цифрами от **1** до **F** (а не от 0 до F). При работе с логическими схемами учтите, что F — это шестнадцатеричное число, которое соответствует числу 15 в десятичной системе исчисления или числу 1111 в двоичной системе. Можно одновременно отобразить все 16 входов инструмента **Logic Analyzer**. С помощью ярлыков **1** и **F** определим, какой вход является первым, а какой — последним.

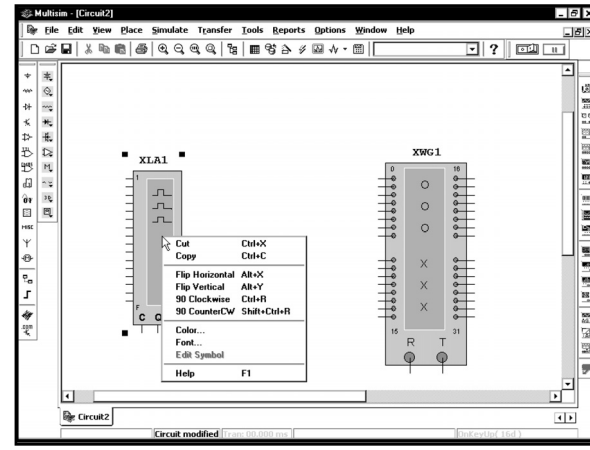
Условное изображение инструмента **Word Generator** показано ниже:



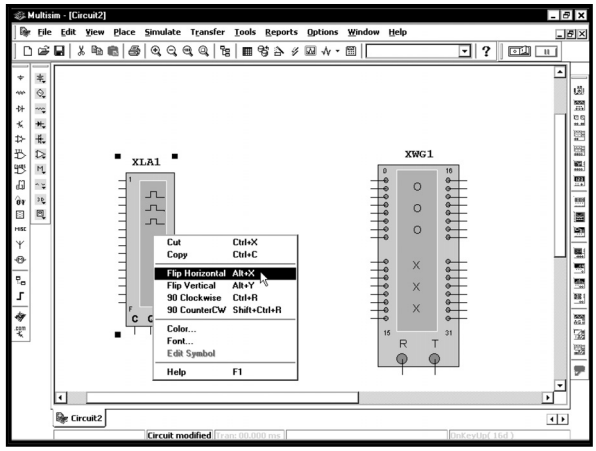
Он имеет 32 выхода, помеченных от 0 до 31. Каждый выход создает логический сигнал, который может использоваться как входной для логической схемы. Выход любого канала является независимым от других каналов.

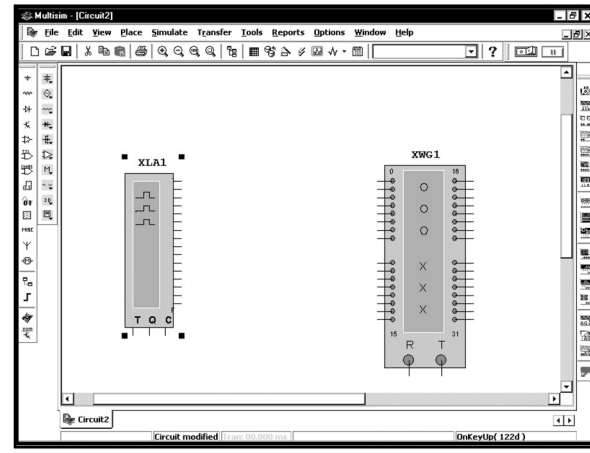
В данном примере будут использоваться первые 4 вывода инструментов **Word Generator** и **Logic Analyzer**. Чтобы упростить работу с инструментами, надо перевернуть **Logic Analyzer** по горизонтали, направив входные контакты в сторону инструмента **Word Generator**. Щелкнем правой кнопкой мыши по иконке **Logic Analyzer**. Появится меню:





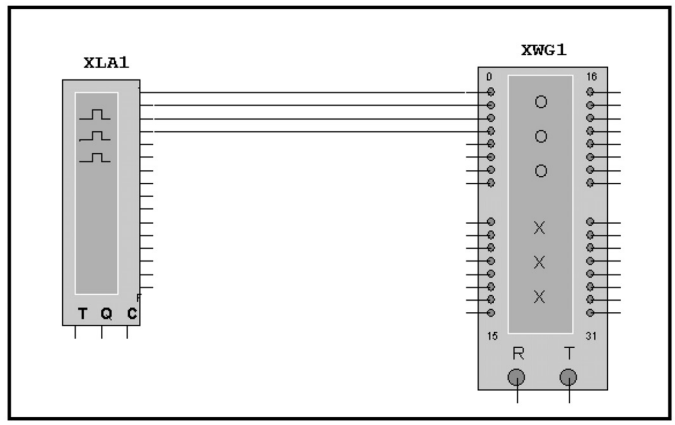
Выберем, как показано, опцию **Flip Horizontal** (**Перевернуть по горизонтали**):



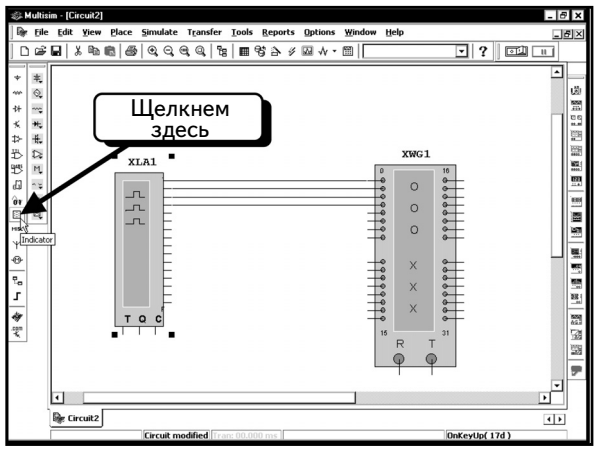


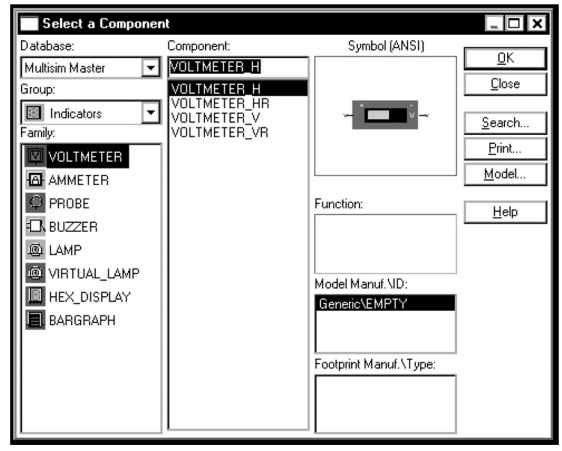
Теперь входные контакты инструмента **Logic Analyzer** находятся справа.

Далее соединим инструменты **Logic Analyzer** и **Word Generator**. (Если вы не знаете, как соединять компоненты, обратитесь к разделу 1.4). Возможно, понадобится переместить один из инструментов вверх или вниз:

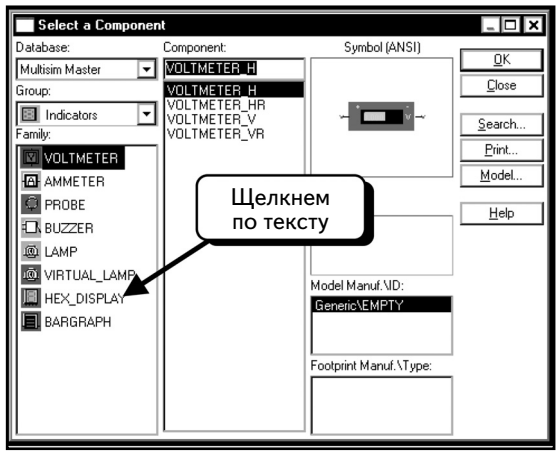


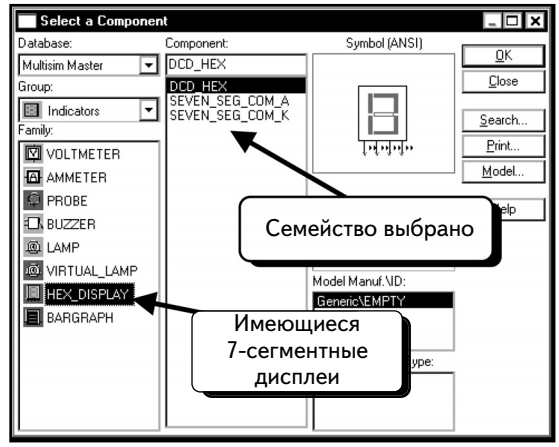
Теперь введем в схему декодирующий 7-сегментный дисплей. Этот компонент находится в группе **Indicator (Индикатор)**. Нажмем кнопку **Indicator** :





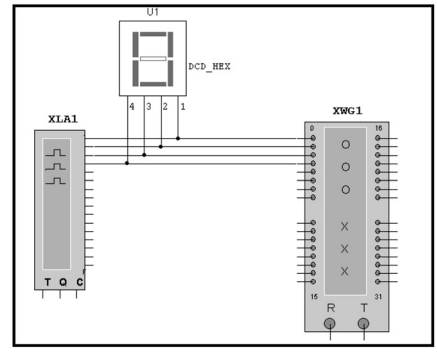
Выберем семейство **HEX_DISPLAY** :



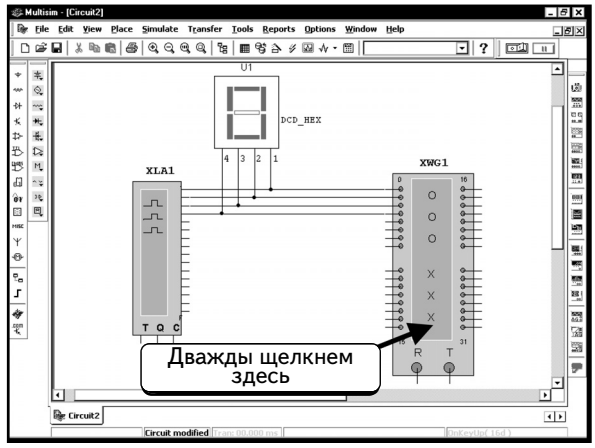


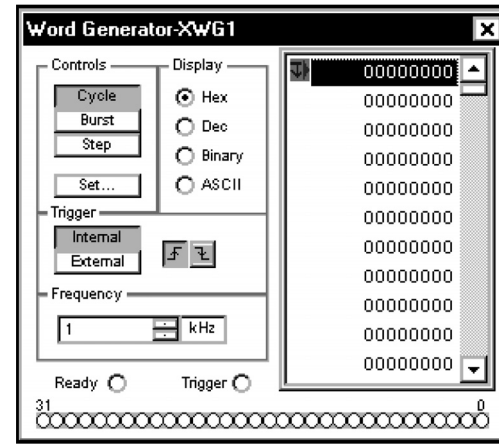
Компонент **DCD_HEX** представляет собой индикатор с 7 сегментами. Это позволяет подать на 4 входа двоичный код от 0000 до 1111 и на буквенно-цифровом дисплее получить его шестнадцатеричный эквивалент от 0 до F. Система преобразования входных двоичных сигналов встроена в компонент. Два других компонента имеют входы, каждый из которых управляет непосредственно 1 сегментом. Для управления придется добавить схему преобразования сигналов. Если вами освоены индикаторы, скорее всего, вы воспользуетесь компонентом **Seven_Seg_Com_K** или **Seven_Seg_Com_A**, т. к. схема уже включает все необходимые элементы. Если необходимо отобразить состояние 4 двоичных входов, выберите компонент **DCD_HEX**, тогда достаточно добавить его в схему и подключить четыре входа.

Компонент **DCD_Hex** выделен по умолчанию; нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить его в схему. Подключим компонент так, как показано:



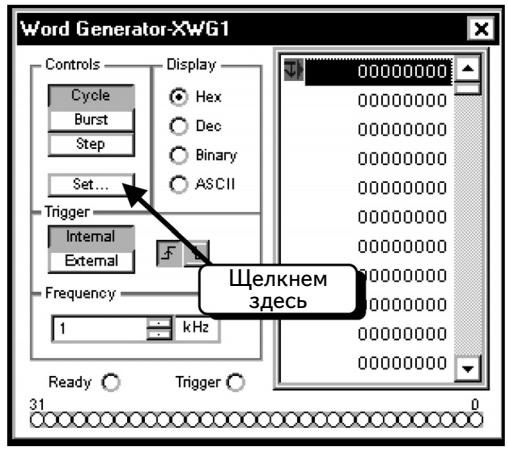
Последнее, что следует сделать до моделирования, — это запрограммировать инструмент **Word Generator**. Дважды щелкнем по компоненту **Word Generator**:

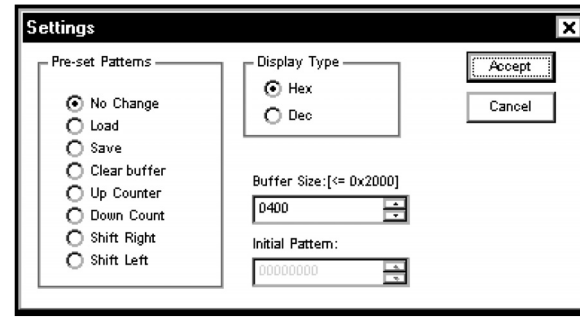




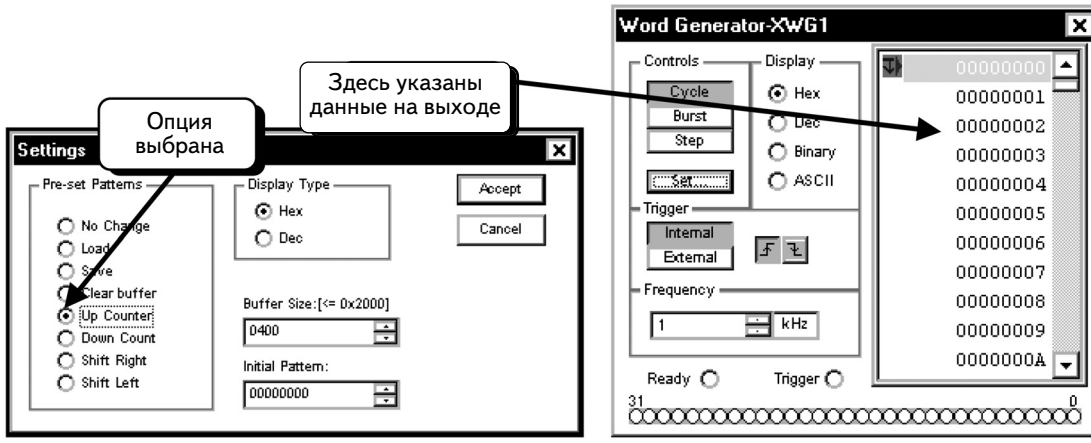
Чтобы инструмент **Word Generator** выполнял счет от 0 до 15 (F) и обратно, нам потребуется 30 (1E) значений, которые займут 30 ячеек памяти инструмента **Word Generator**. Необходимы только 30 ячеек, поскольку придется возвращаться к ячейке, в которой записан 0.

Можно автоматически создать возрастающие значения. Нажмем кнопку **Set** (**Настроить**):

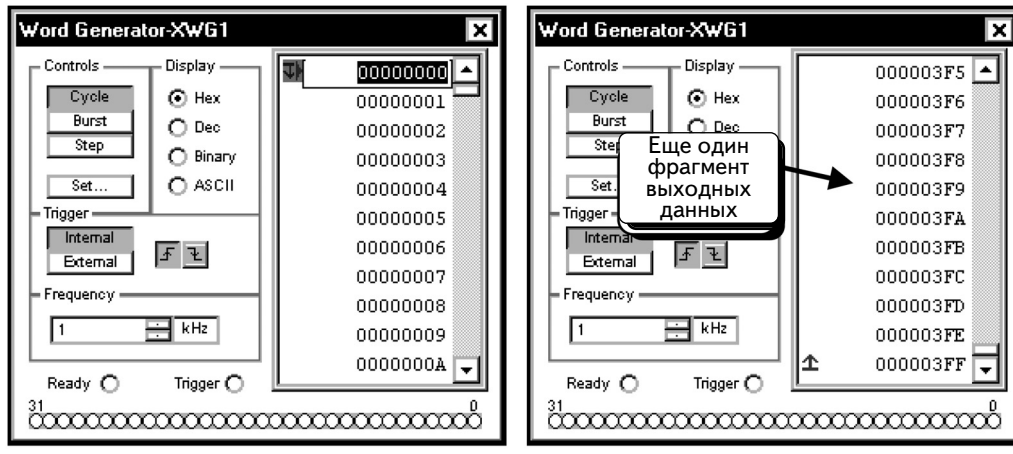




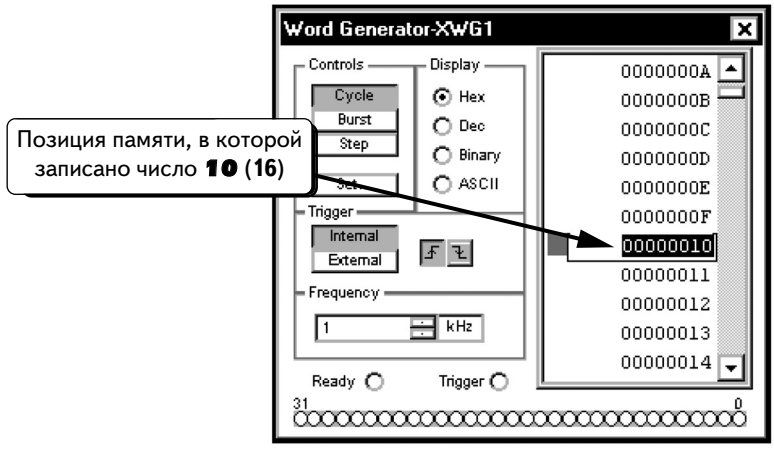
Это диалоговое окно позволяет загрузить и сохранить данные в файл, а также создать стандартные системы счета. Выберем опцию **Up Counter** (**Возрастающий счет**) и нажмем кнопку **Accept** (**Принять**), как показано ниже:



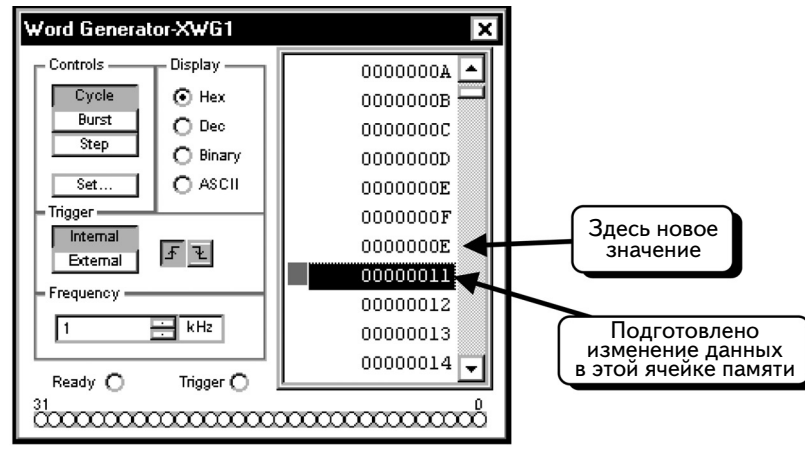
Если посмотреть на данные выхода, можно заметить, что счет выполняется в шестнадцатеричной системе от 0 до 3FF:



Это значит, что можно создать возрастающую систему счета. Нисходящую систему счета необходимо сформировать вручную. Найдем адрес 10 (шестнадцатеричное число) и выделим его. Для этого щелкнем по ячейке:

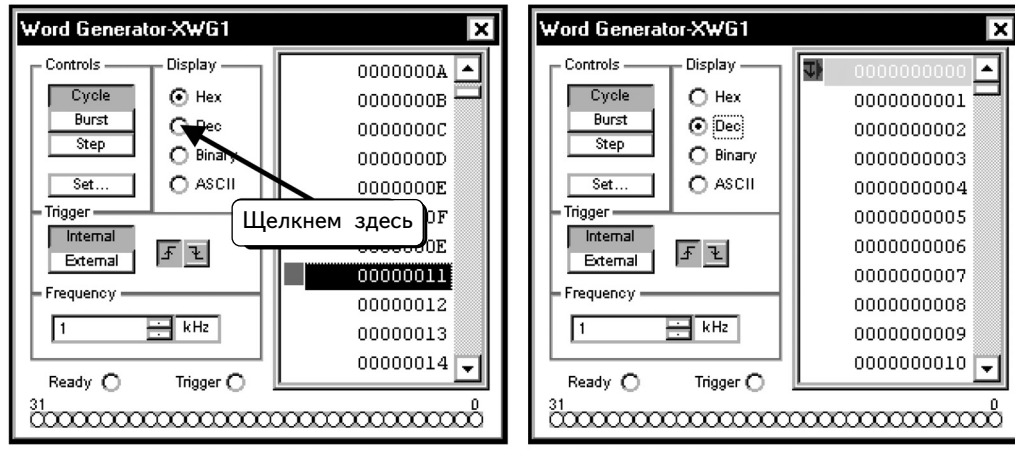


Новое значение можно ввести как двоичное или шестнадцатеричное число или как код ASCII (для нашего примера он не подходит). Далее необходимо записать в эту ячейку **Word Generator** шестнадцатеричный код E. Введем «**E**» и нажмем клавишу **ENTER**. Курсор переместится в следующую ячейку памяти, появится возможнось изменить ее содержимое:

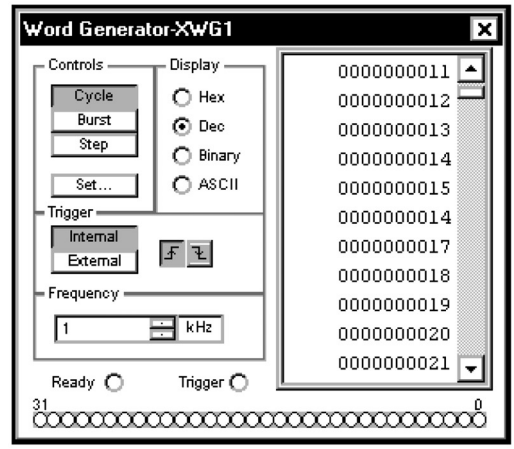


Можно изменить и следующий адрес памяти.

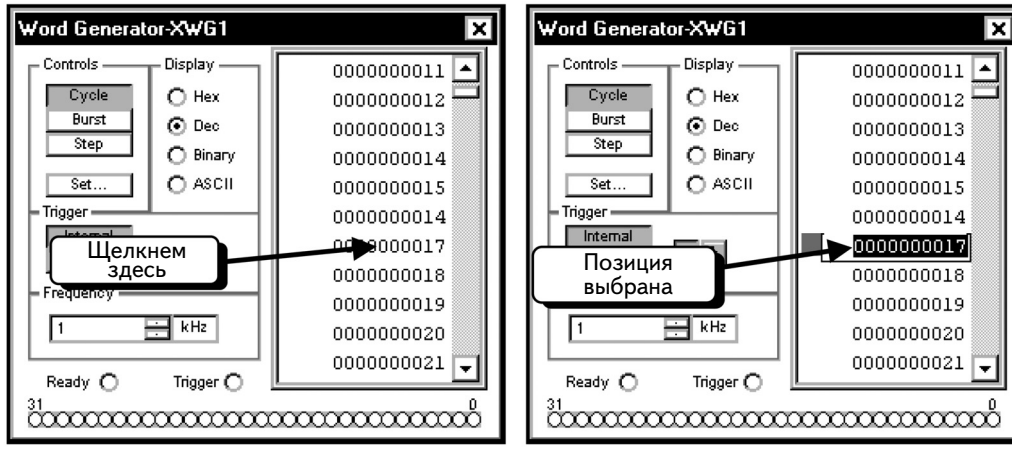
Чтобы показать, как работать с функцией ***Display***, изменим значение на **Decimal**. Выберем опцию ***Dec***:



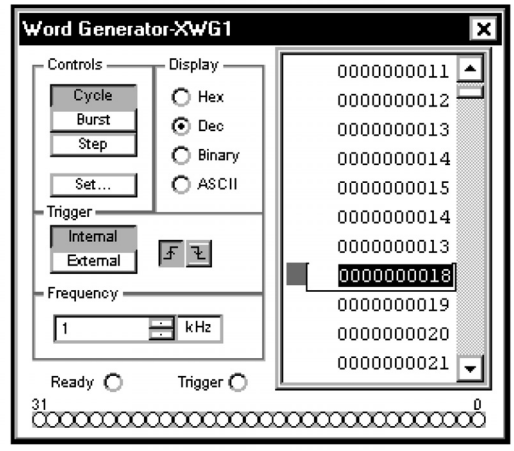
Адрес данных был обнулен. Если просмотреть данные, то видно, что теперь информация отображена в десятичном коде:



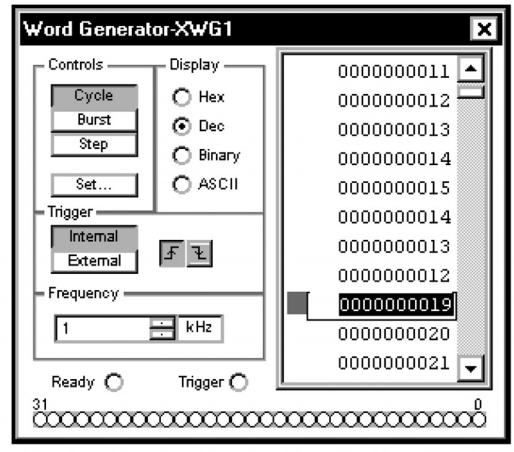
Видно, что сейчас система выполняет счет от ***0*** до ***15***, потом возвращается к ***14*** (т. к. уже было записано одно число для отсчета в нисходящем порядке), переходит к ***17*** и продолжает считать в восходящем порядке. Щелкнем по значению ***17***, чтобы изменить данные:



Если ячейка памяти выбрана, можно ввести в нее новое значение. Чтобы продолжить отсчет в нисходящем порядке, введем число **13** и нажмем клавишу **ENTER**:

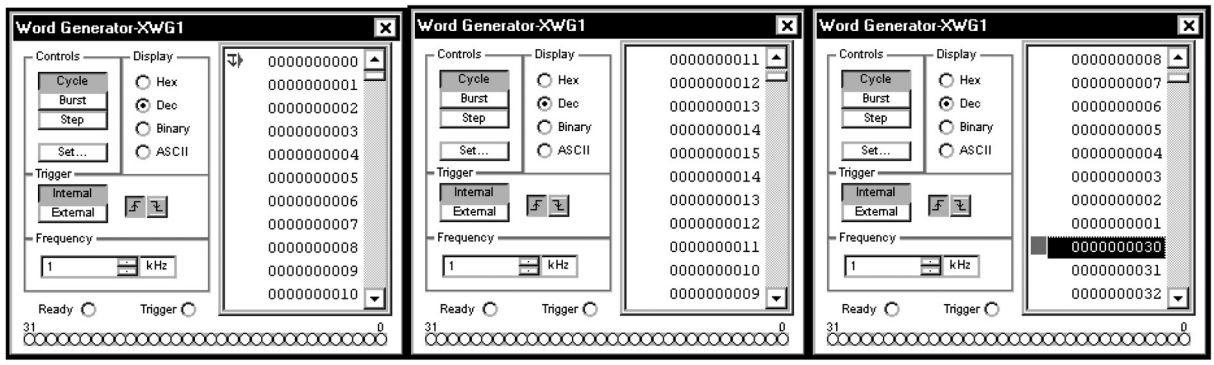


Теперь можно перейти к следующей ячейке памяти. Введем значение **12** и нажмем клавишу **ENTER**:

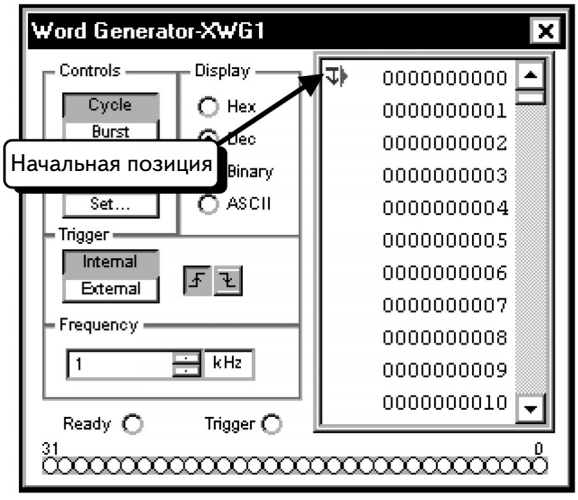


Будем действовать подобным образом, пока не вернемся к значению 1. Значения были заданы в десятичном коде **Decimal (Десятичный)**. Можем отобразить значения в шестнадцатеричном, десятичном, двоичном или ASCII коде.

Когда введем все данные, окно инструмента **Word Generator** должно выглядеть так, как показано ниже:

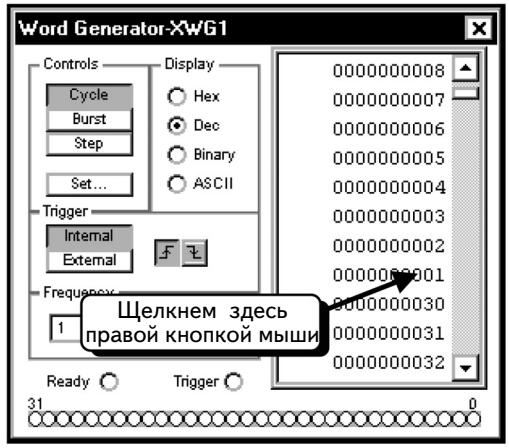


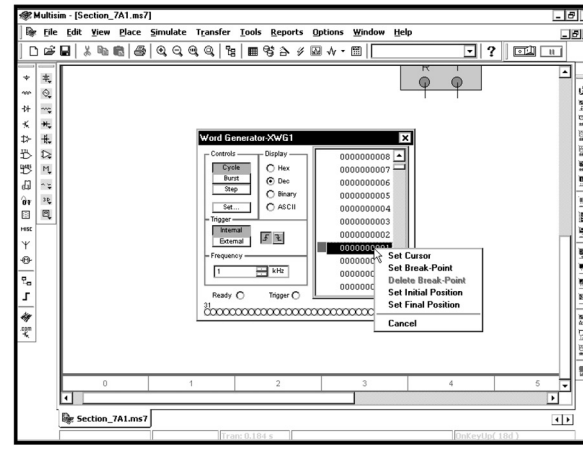
Далее сообщим инструменту **Word Generator**, где находятся начальная и конечная ячейки данных. Моделирование начинается в начальной ячейке данных и завершается в конечной. По умолчанию начальная ячейка имеет значение 0 и обозначается синей стрелкой, направленной вниз  :



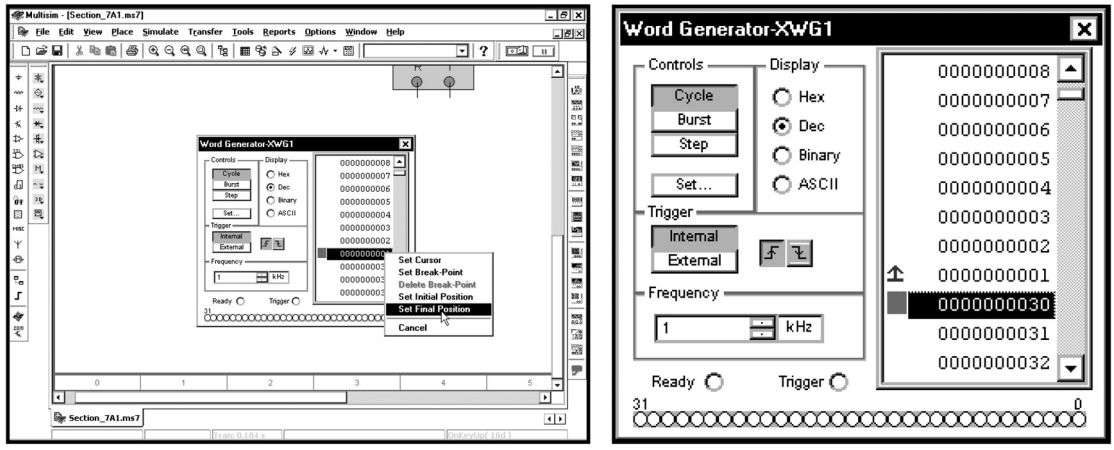
Новый цикл моделирования начнется в ячейке, которая содержит индикатор начального положения.

По умолчанию конечная ячейка данных располагается после всех 1024 ячеек. В данном примере используются только 30 ячеек данных (с адресами от 0 до 29), поэтому необходимо переместить индикатор конечной ячейки. Найдем последнюю ячейку в последовательности и щелкнем по ней правой кнопкой мыши:



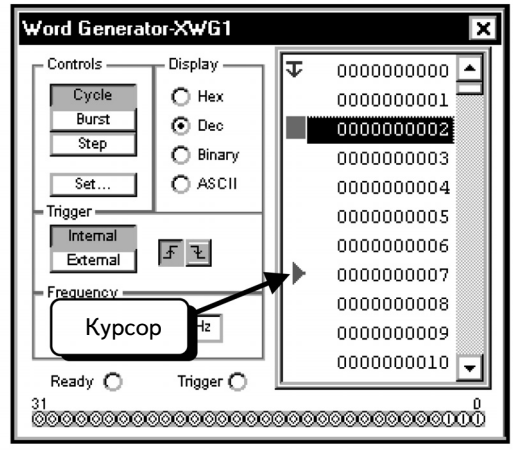


Выберем опцию **Set Final Position (Настроить конечное положение)**, как показано:



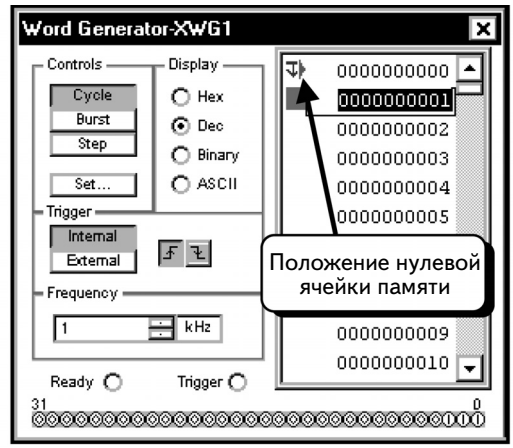
Видно, что индикатор конечного положения появился рядом с последней запрограммированной ячейкой памяти. При выполнении моделирования инструмент **Word Generator** будет проходить цикл только для данных, расположенных между индикаторами начального и конечного положения.

Запрограммировав **Word Generator**, надо выбрать режим его работы. Режим ***Cycle*** **(Цикл)** обозначает, что инструмент **Word Generator** последовательно выводит содержимое каждой ячейки памяти от начальной до конечной. Когда инструмент достигает конечной ячейки, он возвращается к начальной и повторяет цикл. В режиме ***Cycle*** цикл будет повторяться до тех пор, пока не будет остановлено моделирование. В режиме ***Burst*** **(Просмотр)** цикл будет повторен только один раз. В режиме ***Step*** **(Шаг)** будет выведено содержимое лишь одной ячейки. При щелчке по кнопке ***Step*** инструмент **Word Generator** будет переходить к следующей ячейке, выводя ее содержимое. Индикатор будет указывать на данную ячейку, пока вновь не будет нажата кнопка ***Step***. Этот режим полезен при отладке схем. Если во время программирования инструмента **Word Generator** щелкнуть по ячейке памяти правой кнопкой мыши и выбрать опцию **Set Break-Point (Настроить точку прерывания)**, данная ячейка будет настроена как точка прерывания. **Word Generator** остановится в точке прерывания в режиме ***Cycle*** или ***Burst*** . Процесс перемещения по ячейкам не возобновится до тех пор, пока не будет нажата кнопка ***Cycle***, ***Burst*** или ***Step***. Чтобы удалить точку прерывания, щелкнем по ячейке памяти и выберем команду **Remove Break-Point (Удалить точку прерывания)**.

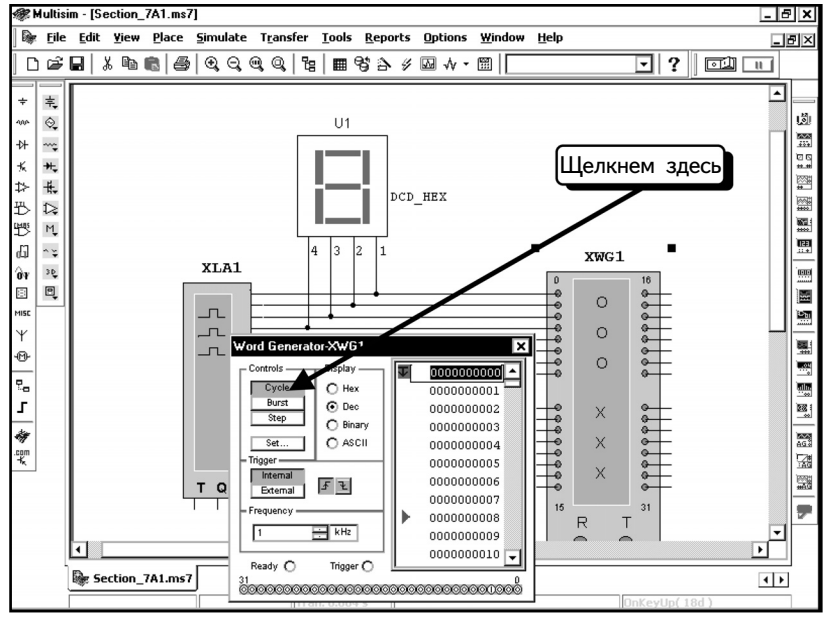


Во время моделирования курсор в окне **Word Generator** указывает на текущую ячейку:
В начале моделирования инструмент **Word Generator** начнет вывод данных с текущей ячейки. В процессе моделирования курсор будет перемещаться по ячейкам, которые обрабатываются инструментом **Word Generator**. Остановив моделирование, можно щелкнуть по ячейке и выбрать команду **Set Cursor (Настроить курсор)**, чтобы изменить положение курсора.

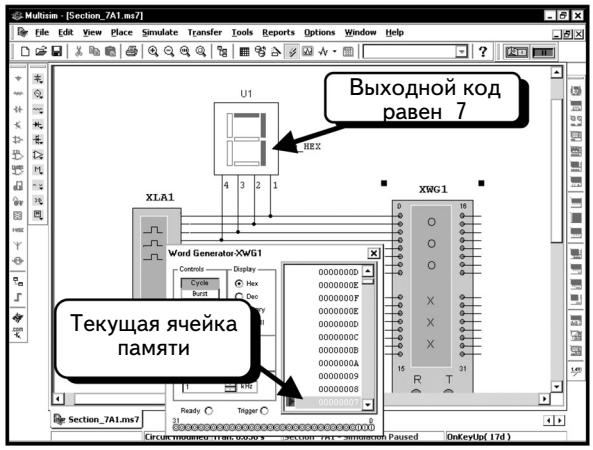
Поместим курсор в ячейку памяти 0:

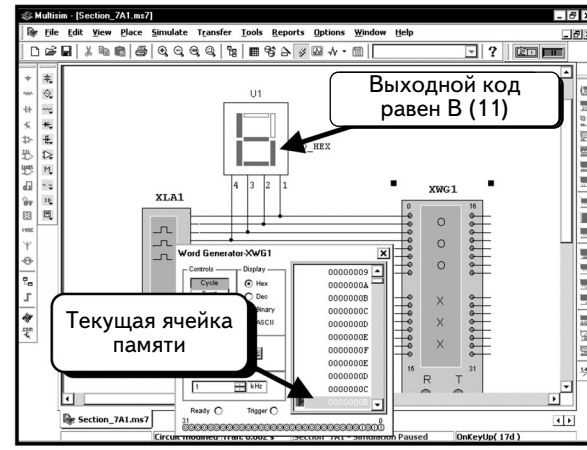


Все готово к моделированию. Убедимся в том, что окно **Word Generator** не закрывает цифробуквенный дисплей U1, и нажмем кнопку **Cycle**:

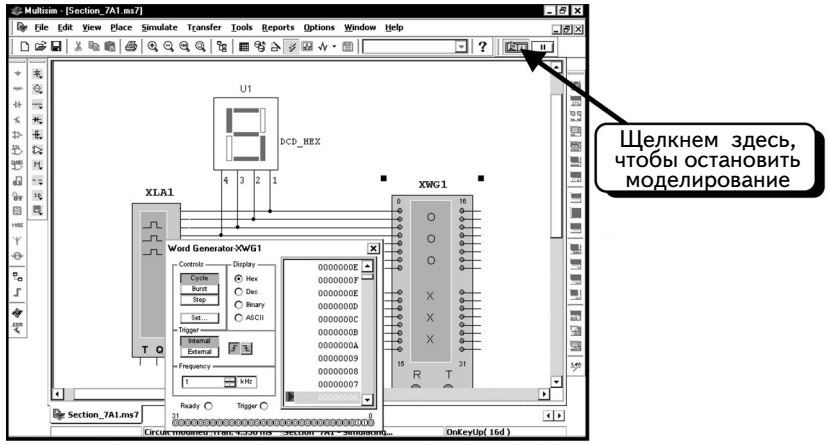


При нажатии этой кнопки начнется моделирование. Будет видно, как дисплей изменит значение от 0 до F, а потом — обратно до 0. Будет подсвечиваться также текущая ячейка памяти.



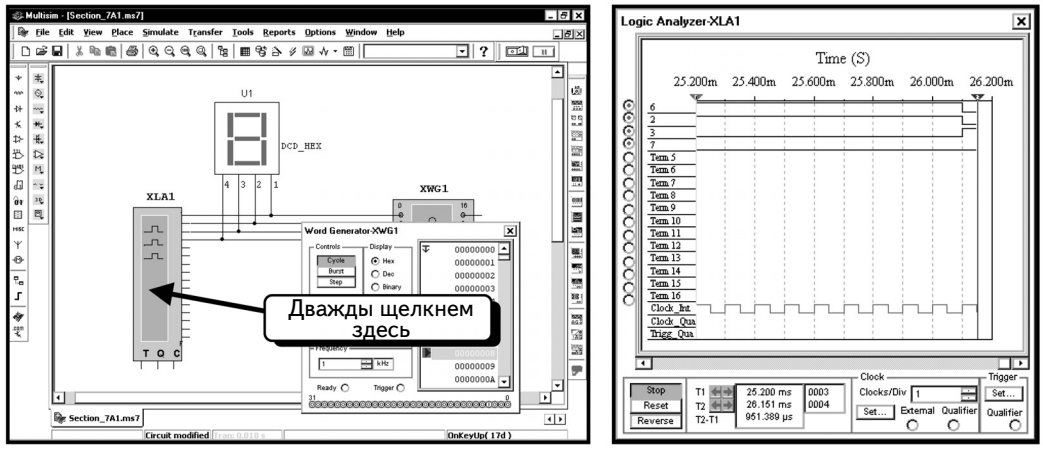


Чтобы остановить моделирование, нажмем кнопку **Run/stop simulation**  .

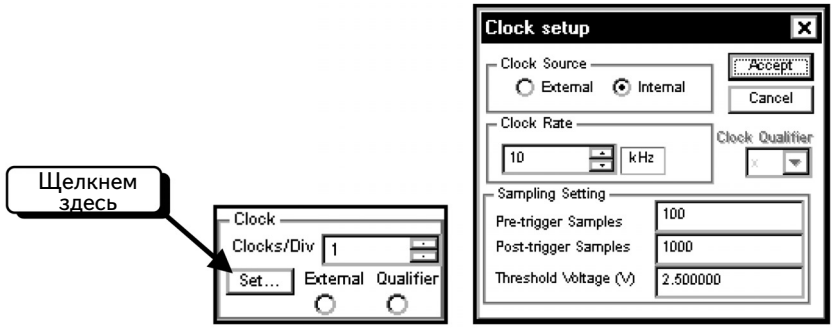


Пользуясь кнопками **Burst** и **Step**, можно изучить работу инструмента **Word Generator**. Помните, что в режиме **Step** для перехода к новой ячейке памяти надо каждый раз нажимать кнопку **Step**.

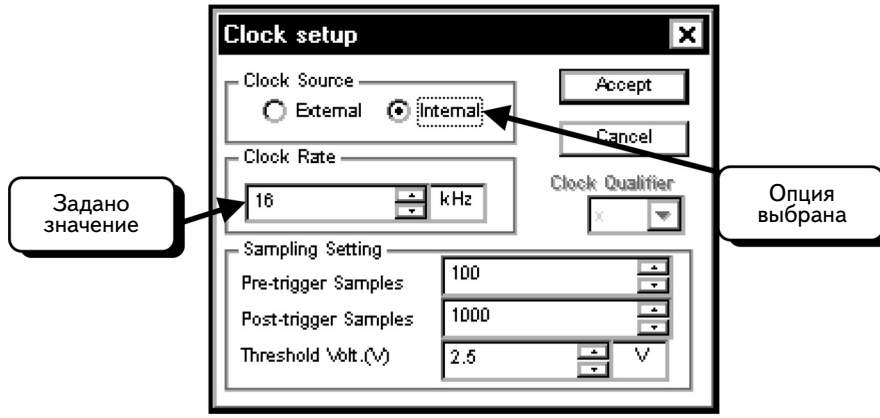
С помощью функции **Logic Analyzer** будем изучать диаграммы логических сигналов. Дважды щелкнем по иконке **Logic Analyzer**, чтобы открыть окно, показанное ниже:



В окне некоторые диаграммы отображаются неверно, поскольку инструмент **Logic Analyzer** пока не настроен. Щелкнем по кнопке **Set** в разделе **Clock** (**Таймер**), чтобы изменить частоту выборки:

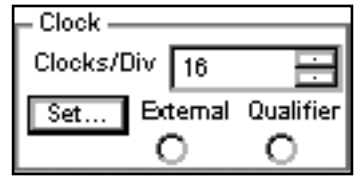


Таймер задает частоту выборки (sample rate) инструмента. В каждом цикле таймера **Logic Analyzer** анализирует состояние входных каналов и отображает его на экране. Даже если входные значения изменятся, значения на экране сохранятся до следующего цикла. Это значит, что частота выборки должна намного превышать частоту изменения входного сигнала. Инструмент **Word Generator** был настроен на частоту 1 кГц, следовательно, параметр **Clock Rate** (**Частота таймера**) инструмента **Logic Analyzer** должен иметь более высокое значение. Выберем частоту, которая превышает значение 1 кГц в 2^n раз. Почему так надо сделать, будет ясно позднее. Выберем значение 16 кГц:

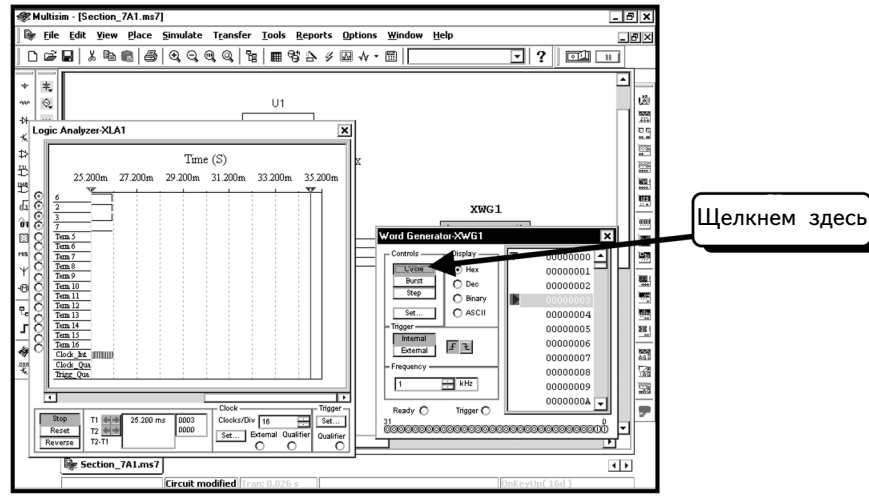


Убедимся, что параметр **Clock Source** (**Источник синхронизации**) настроен на режим **Internal** (**Внутренний**). Мы не обеспечиваем синхронизацию, поэтому **Logic Analyzer** самостоятельно сформирует необходимый сигнал. После этого нажмем кнопку **Accept**.

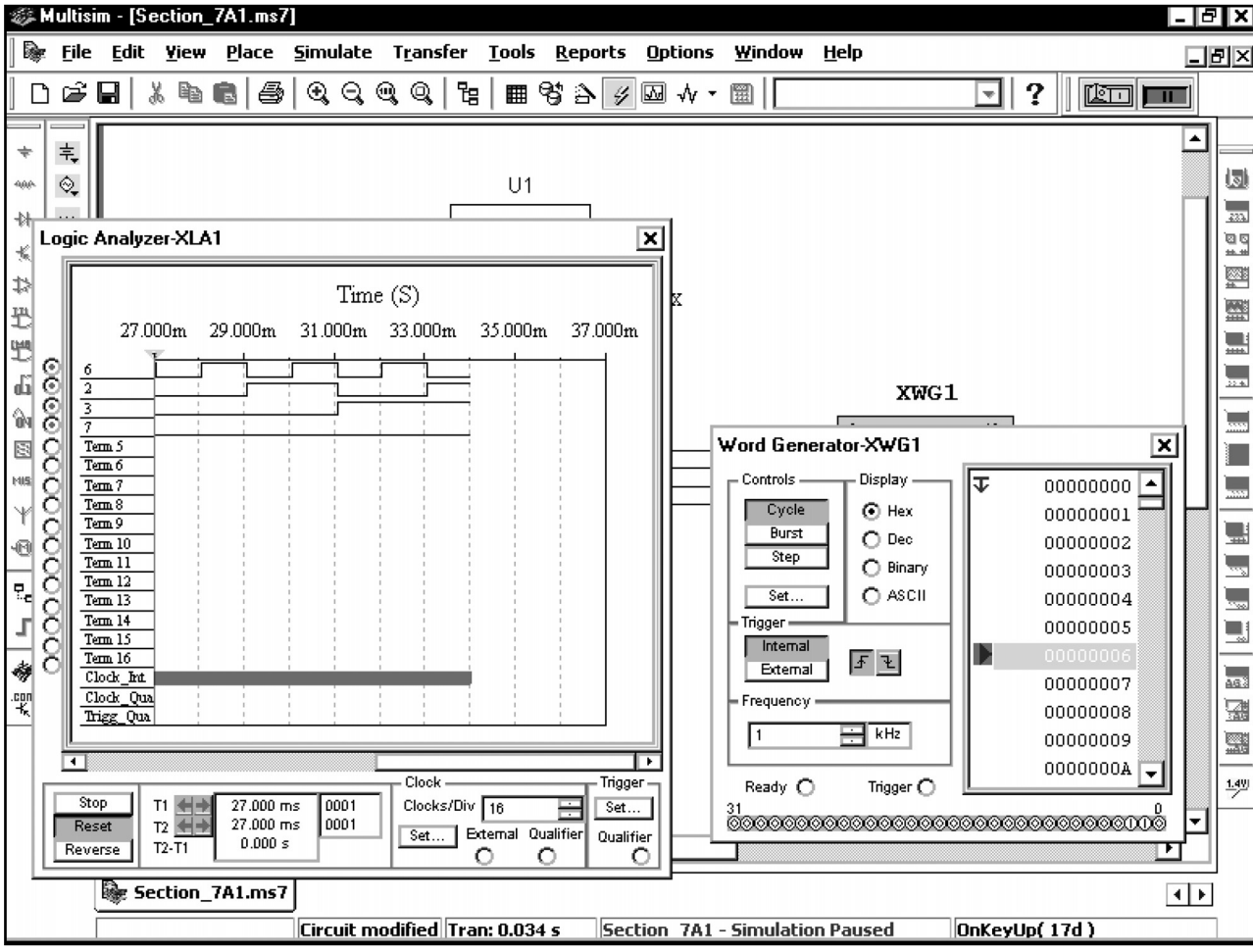
Настроим дисплей анализатора. На дисплее имеются деления, следовательно, необходимо указать количество импульсов таймера, приходящихся на деление (**Clocks/Div**). Можно выбрать значение 1, 2, 4, 8, 16 и так далее — до 128. Именно по этой причине выбрана частота таймера, превосходящая в 2^n раз частоту **Word Generator**. Для параметра **Clocks/Div** мы выбрем значение 16. Так как частота таймера **Logic Analyzer** составляет 16 кГц, деление по времени будет равно 1 мс, что соответствует периоду частоты **Word Generator**:



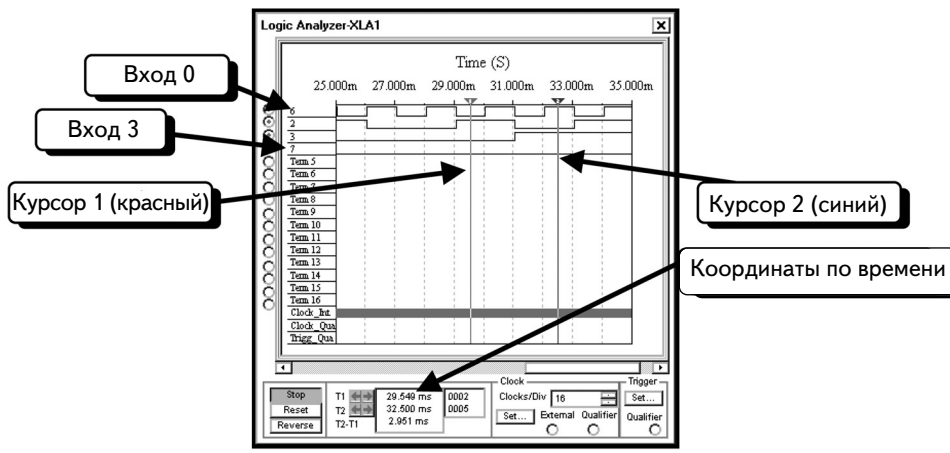
Все готово к моделированию. Нажмем кнопку **Cycle**:



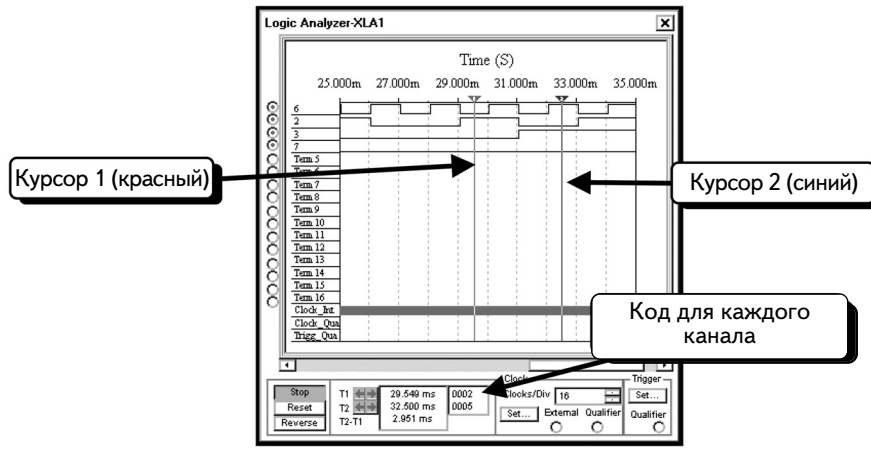
Начнется моделирование, и на экране **Logic Analyzer** появятся данные:



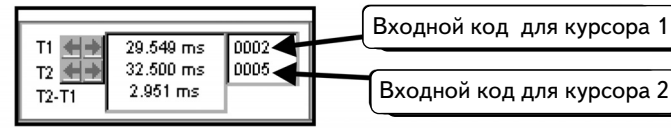
Если остановить моделирование, нажав кнопку **Run/Deactivate** , то можно измерить значения на экране с помощью курсоров. Курсор 1 — красный, а курсор 2 — синий. Чтобы переместить курсор, переместим символ в виде треугольника на курсоре. Курсорами управляем так же, как и в разделе 6.1.4. Ниже показан экран с курсорами:



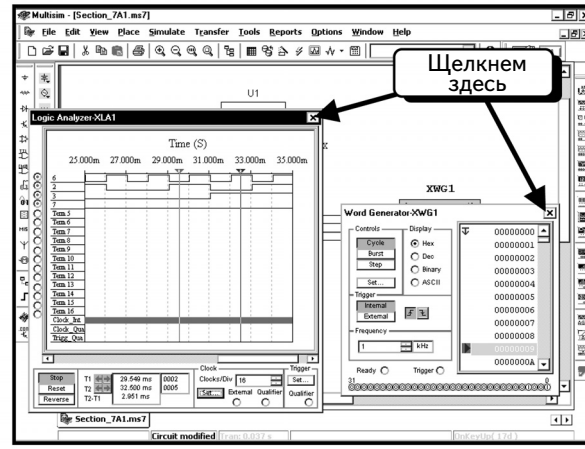
Курсоры показывают координаты по времени, а также временной сдвиг между курсорами. Кроме того, с помощью курсоров можно получить входные значения. Если вход 0 будем считать самым младшим разрядом, а вход 15 — самым старшим, то состояние входов **Logic Analyzer** может быть представлено 16-разрядным двоичным кодом. Соответствующий ему шестнадцатеричный код отображен в окне курсора:



Если посмотреть на курсор 1, то видно, что входы 0, 2 и 3 находятся на низком логическом уровне, а вход 1 — на высоком. Все прочие входы не используются, и диаграммы для них не выводятся. Таким образом, состояние входов в момент, соответствующий положению курсора 1, отображается числом 0010, то есть 2 (в шестнадцатеричном коде). Если посмотрим на курсор 2, то заметим, что входы 1 и 3 находятся на высоком уровне, а входы 2 и 4 — на низком. Таким образом, состояние входов, соответствующее положению курсора 2, отображается двоичным числом 0101, то есть 5 в шестнадцатеричном коде. Эта информация и показана в окне курсора:



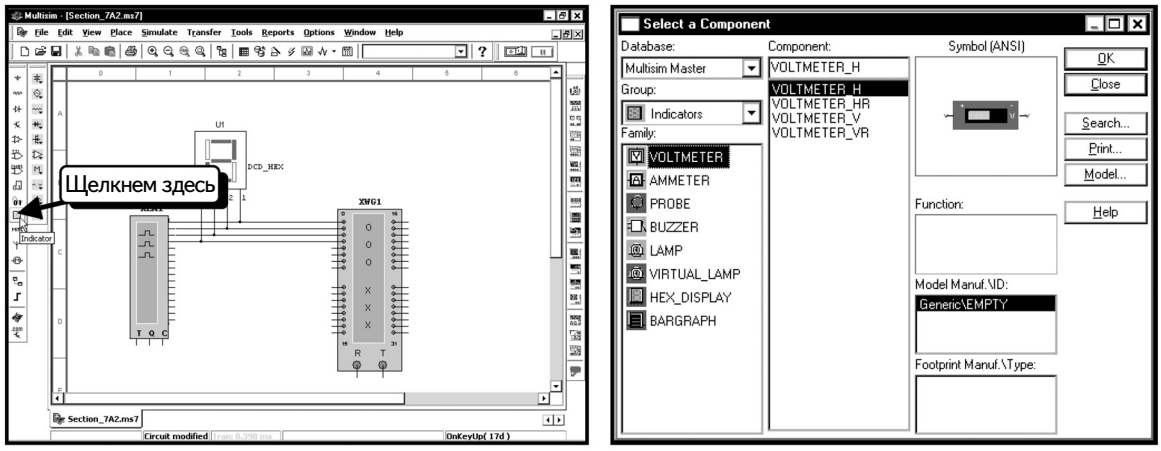
Измерения завершены и можно закрыть окна. Нажмем кнопку с символом :



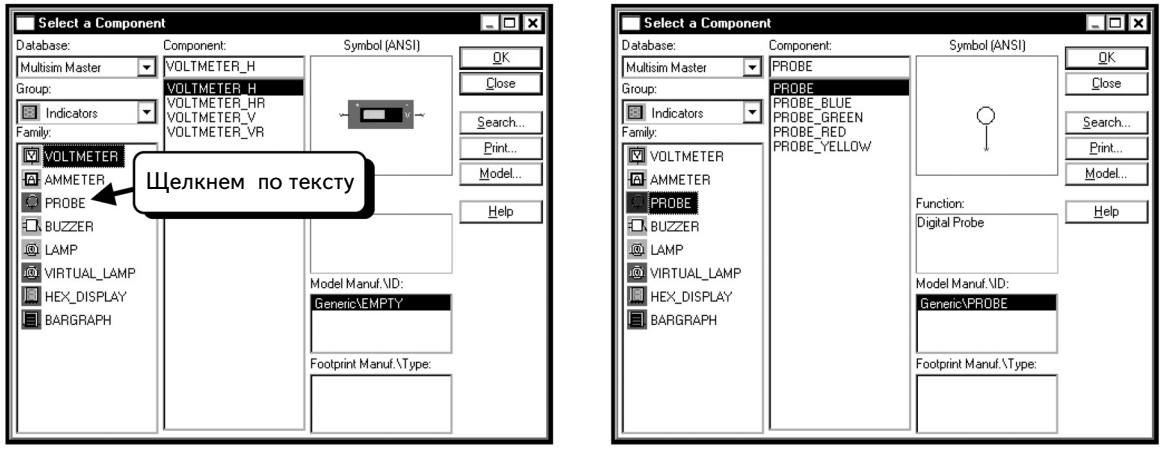
Работа с этой схемой будет продолжена в следующем разделе.

7.1.2. Цифровой пробник и недешифрирующие столбиковые индикаторы

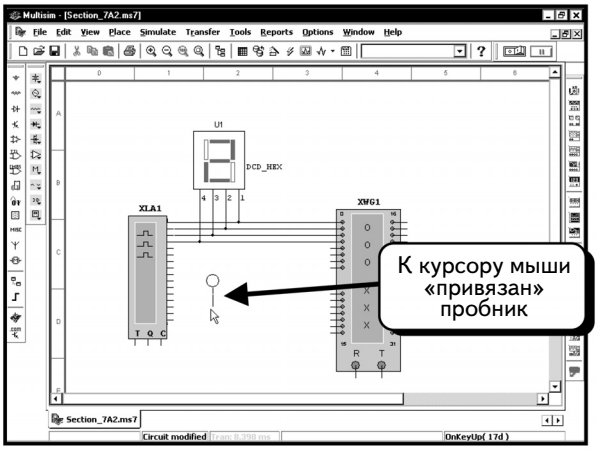
Далее рассмотрим два индикатора, которые могут использоваться для просмотра состояния одного бита. Логический пробник (digital probe) напрямую подключается к проводу и показывает его уровень. Недешифрирующий столбиковый индикатор (undecoded bar graph) представляет собой набор из десяти диодов, аналогичный набору светодиодов. Он подключается так же, как и набор светодиодов, но отличается от него по ряду параметров. Диоды обладают внутренним сопротивлением и требуют тока 5 мА. Позднее об этом будет рассказано подробно. Логический пробник расположен в группе Indicators. Щелкнем кнопку **Indicator** :



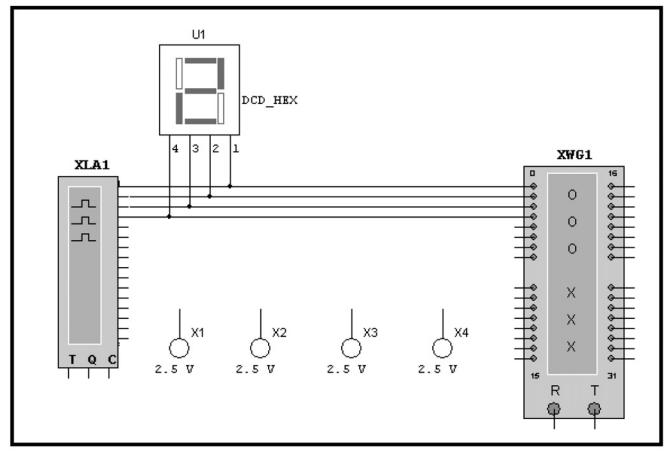
Щелкнем по объекту **PROBE** (**Пробник**), чтобы выбрать семейство:



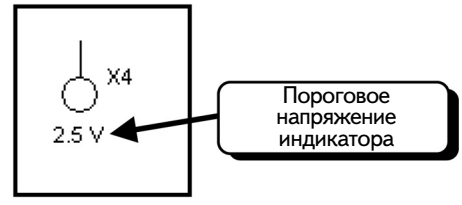
Нам доступны пять пробников. Один из них серый, другие — цветные. Выберем пробник и нажмем кнопку **OK**. Условное обозначение пробника будет «привязано» к курсору мыши:



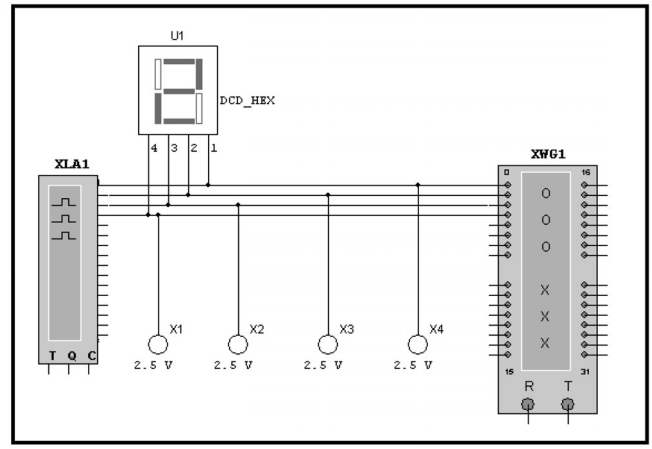
Введем в схему четыре пробника. Чтобы повернуть компонент, нажмем клавиши **CTRL+R**. Добавим в схему четыре разноцветных пробника:



Обратите внимание на запись **2.5 V** около условного обзначения пробника:

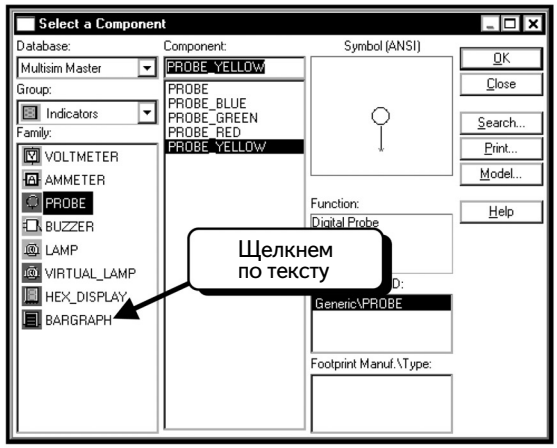


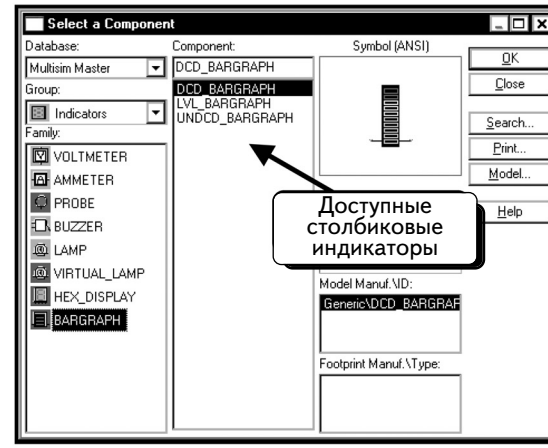
Это — пороговое значение напряжения для пробника. Он не будет светиться  , если напряжение на нем меньше порогового, и засветится  при достижении напряжением порогового значение, которое будет показано на схеме, что упрощает настройку. Для нашего примера пороговое значение **2,5 В** является идеальным, поэтому не будем его изменять. Пробник не потребляет тока, следовательно, не нужно беспокоиться о его воздействии на схему. Подключим пробники, как показано ниже:



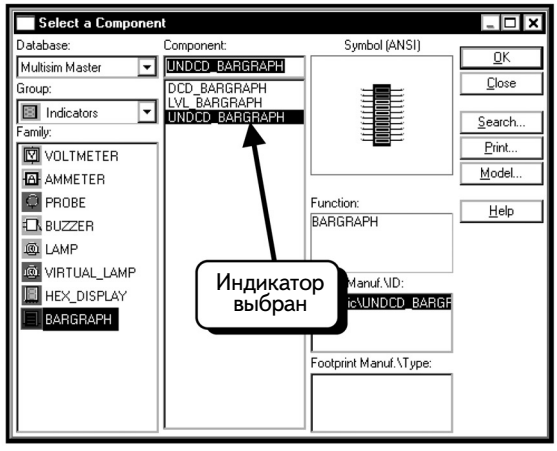
Теперь пробники отобразят состояние каждого входа инструмента **Word Generator**. Самый правый пробник (**X4**) — это самый младший бит, а самый левый (**X1**) — самый старший бит.

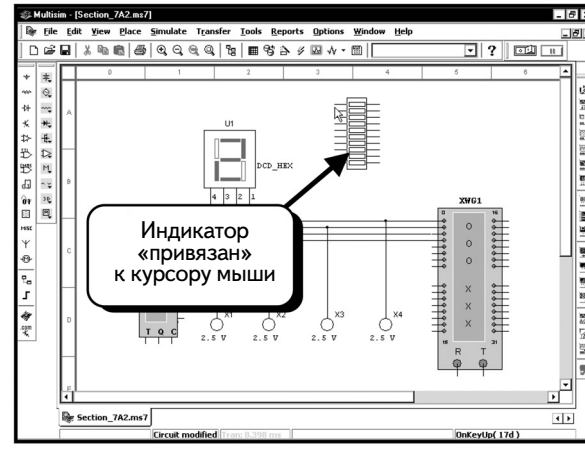
Добавим теперь в схему столбиковый индикатор. Этот индикатор тоже находится в группе **Indicators**. Щелкнем по объекту **BARGRAPH**, чтобы выбрать необходимое семейство:





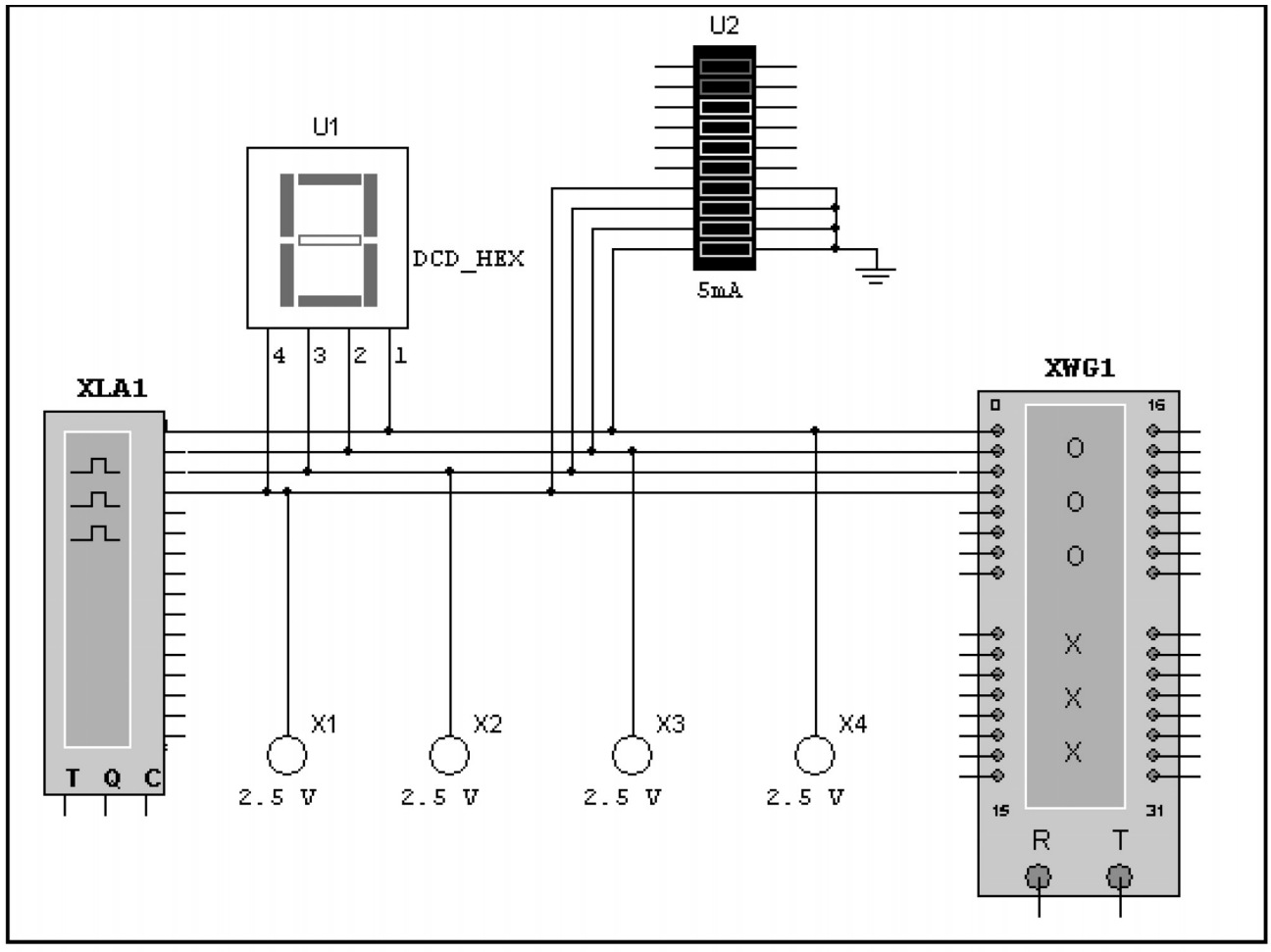
Диалоговое окно отобразит список всех доступных индикаторов. Нам необходимо использовать индикатор **UNDCD_Bargraph**. Выделим его и нажмем кнопку **OK**. Компонент будет «привязан» к курсору мыши:



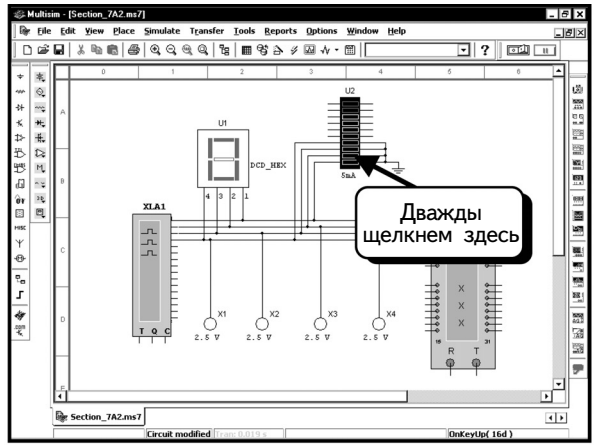


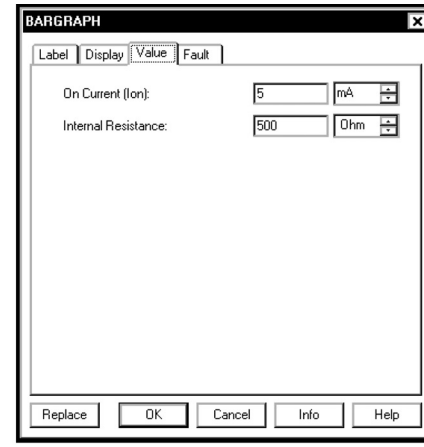
Он представляет собой набор из десяти диодов. Однако они не являются светодиодами. Ток может проходить через них в обоих направлениях, причем они не имеют прямого падения в 1,5 В, характерного для светодиодов. Вместо этого, каждый диод имеет внутреннее сопротивление 500 Ом и характеризуется определенным пороговым значением тока. Как показано выше, когда ток, не превышающий 5 мА, входит в левый контакт диода и выходит из правого контакта (то есть движется слева направо), диод не будет светиться. Эта функция аналогична функции светодиода, хоть и не полностью. Можно изменять как пороговое значение, так и сопротивление компонента. Если перевернуть компонент, то контакты также перевернуться. При начальном размещении компонента расположение контактов известно. Следите за ним при вращении компонента.

Добавим индикатор в схему и подключим его, как показано ниже. Нам не понадобятся дополнительные последовательные резисторы (ограничивающие ток через светодиоды), так как компонент обладает внутренним сопротивлением:



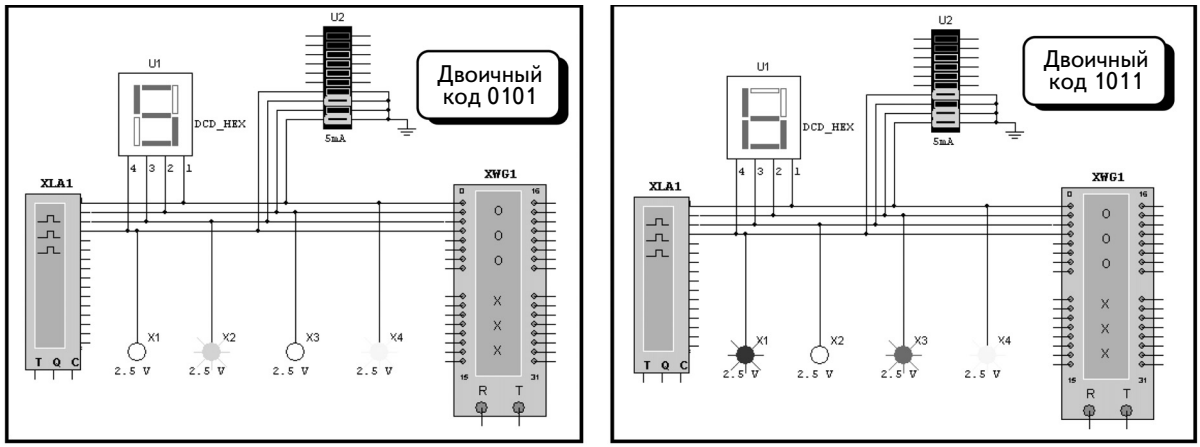
Нет необходимости использовать управляющие схемы, потому что инструмент **Word Generator** может создавать ток, достаточный для свечения диодов. Дважды щелкнув по индикатору, можно увидеть, что пороговое значение составляет 5 мА, а внутреннее сопротивление равно 500 Ом:





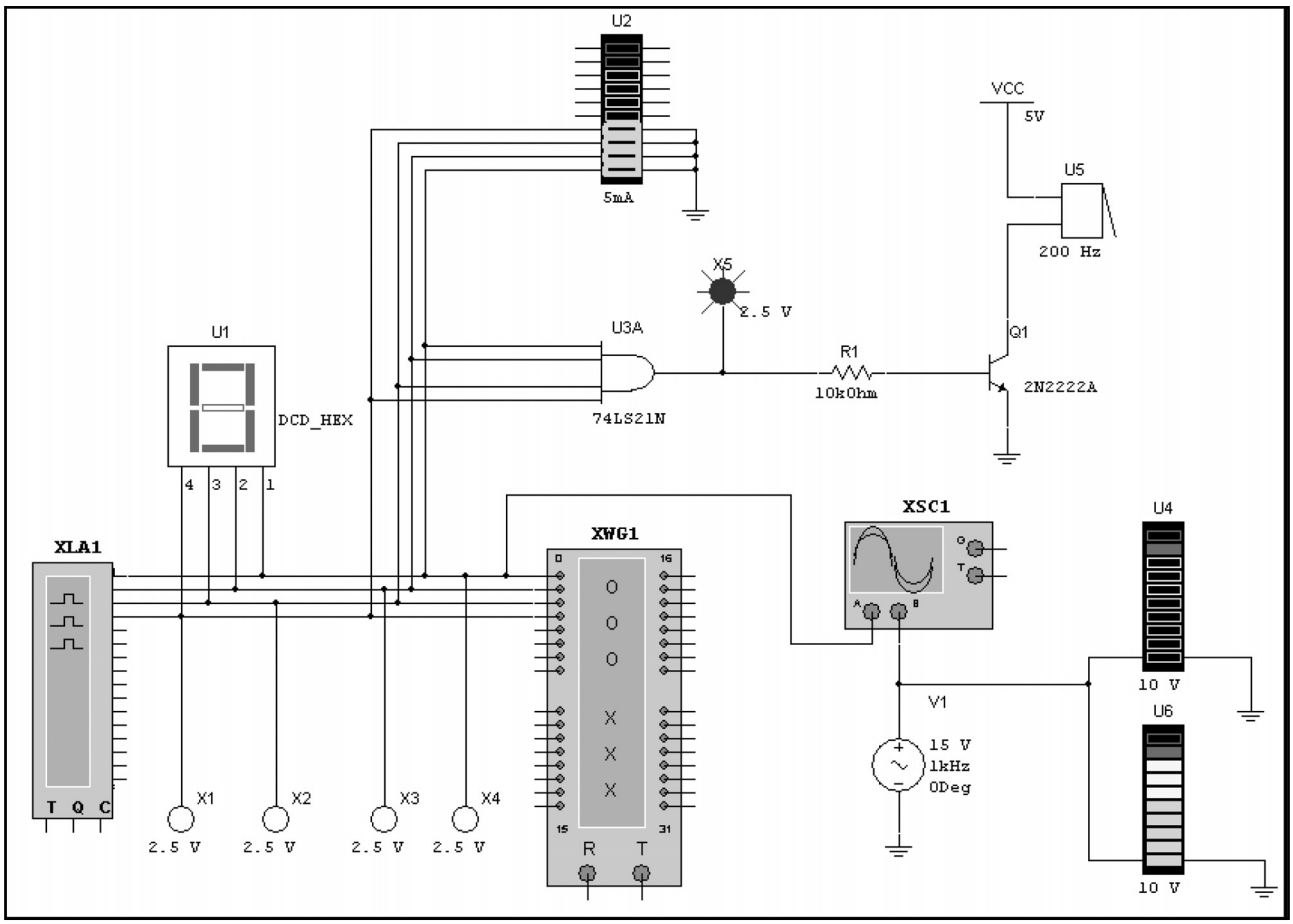
Нажмем кнопку **OK**, чтобы вернуться к схеме:

Теперь все готово к моделированию. Нажмем кнопку **Cycle**, чтобы начать его. Индикатор и пробники отобразят двоичные коды, которые соответствуют данным в окне с информацией:

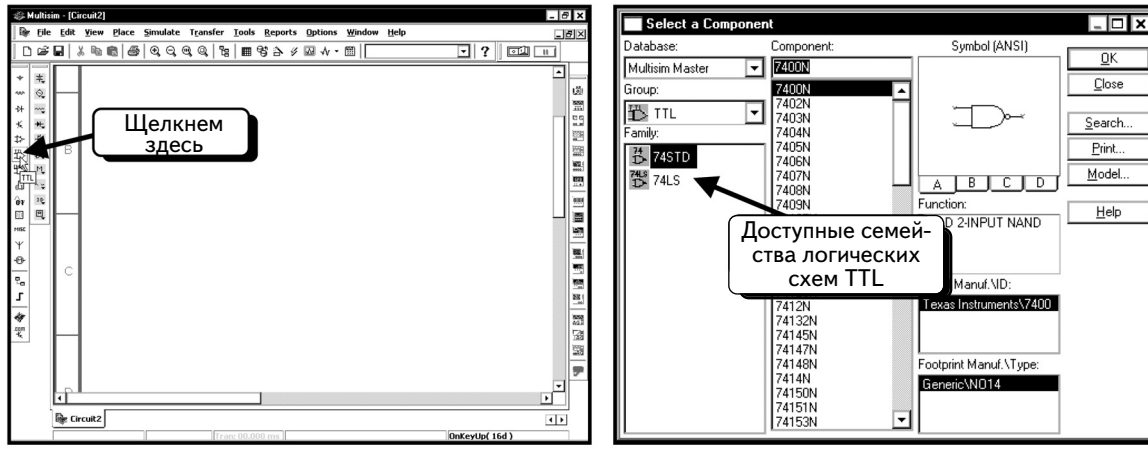


7.1.3. Различные индикаторы сигналов

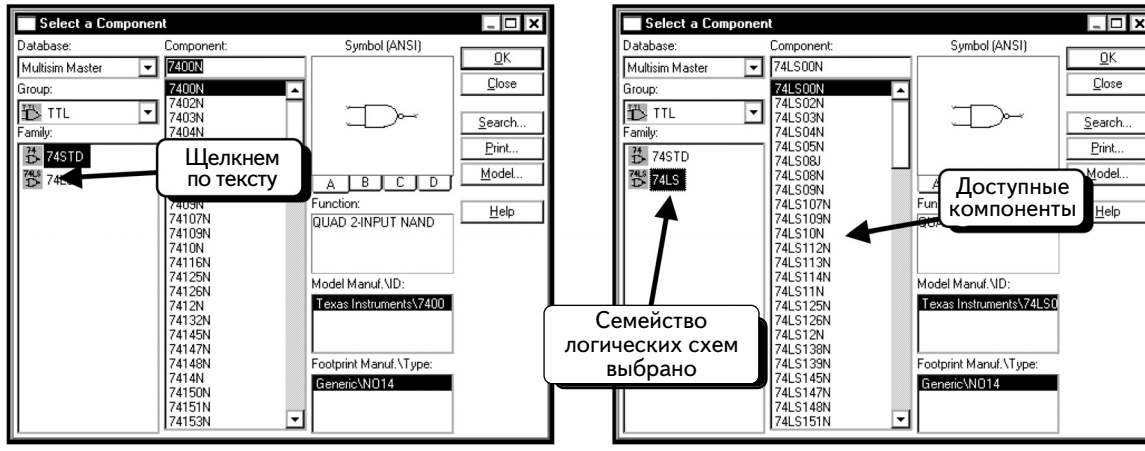
Добавим еще в схему зуммер и проверим работу индикаторов. Воспользуемся также осциллографом, чтобы получить две осциллограммы. Создадим следующую схему (В этой главе использованы некоторые аналоговые компоненты, которые были описаны в 3–6-й главах.):



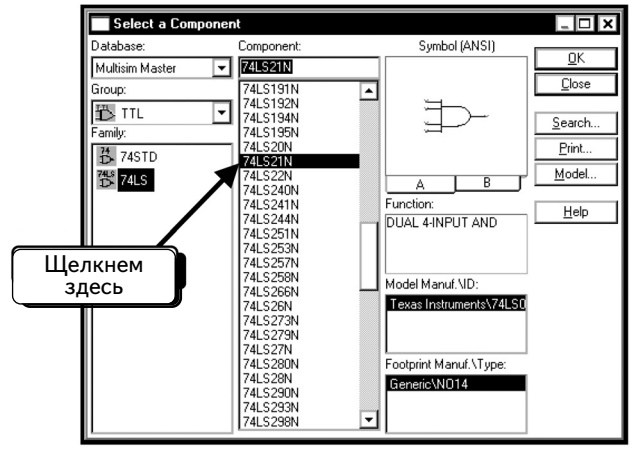
Зуммер находится в группе ***Indicators***; добавим два столбиковых индикатора с помощью методики, которая использовалась при добавлении индикаторов в предыдущем разделе. Компоненты U4 и U6 называются **LVL_Bargraph** и **DCD_Bargraph** и находятся в семействе **Bargraph** группы **Indicators**. Компонент **AND** расположен в группе **TTL**. Чтобы добавить компонент **AND** (схему **И**), нажмем кнопку TTL :



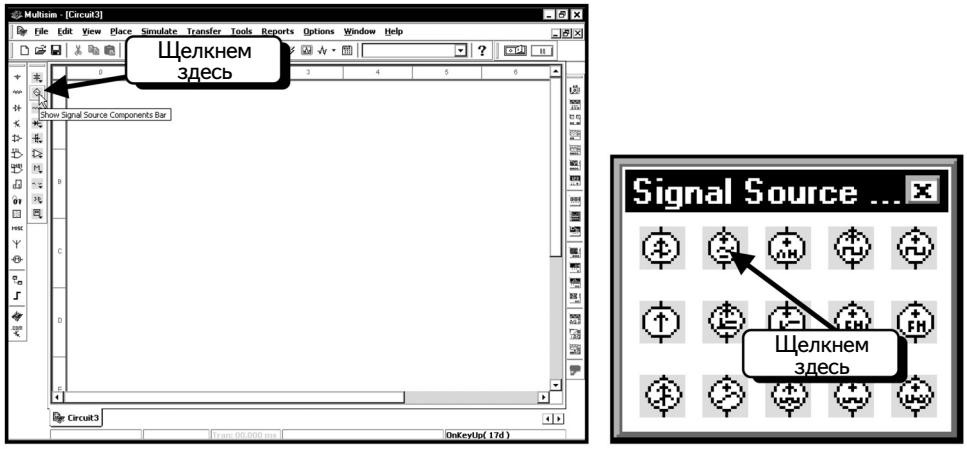
На левой панели показаны доступные семейства компонентов TTL. Видно, что доступны семейства TTL и Schottky TTL. Будем использовать компоненты Шоттки; выберем микросхему ***74LS***:



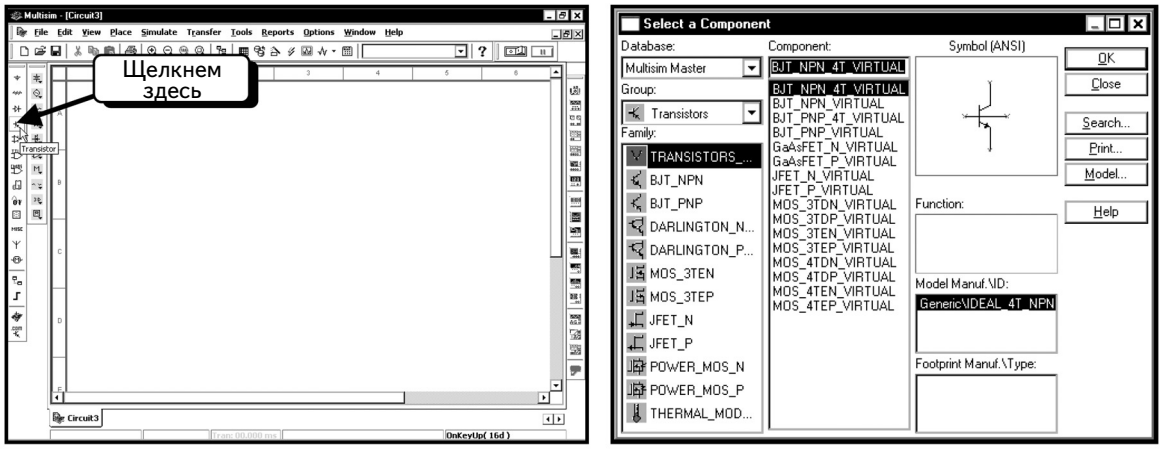
В диалоговом окне отображены все доступные компоненты Шоттки. Найдем компонент 74LS21N и выделим его:



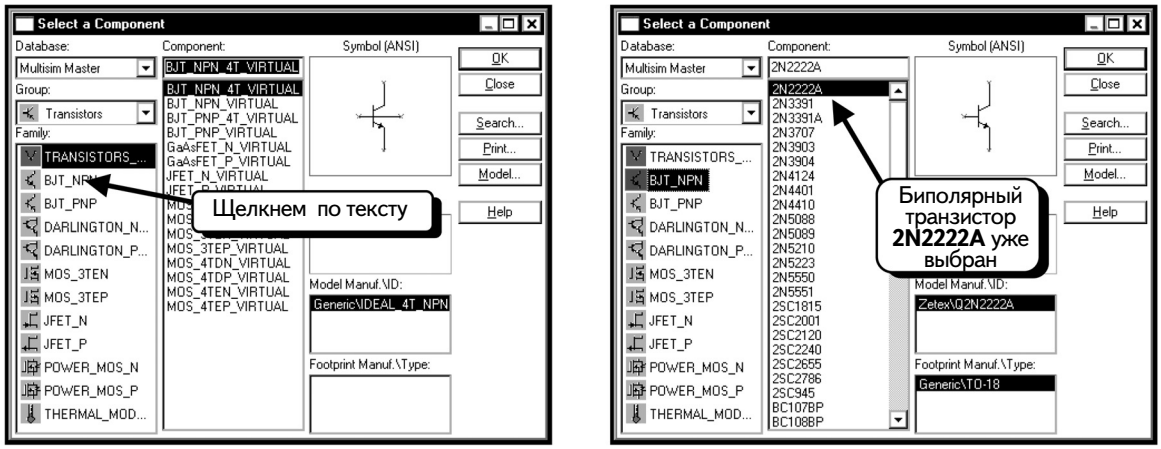
Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить компонент. Добавим также источник переменного напряжения, нажав кнопки ***Show Signal Source Components Bar***  и затем ***AC_VOLTAGE_SOURCE***  :



Нажмем кнопку **Transistor** , чтобы добавить транзистор 2N2222A:

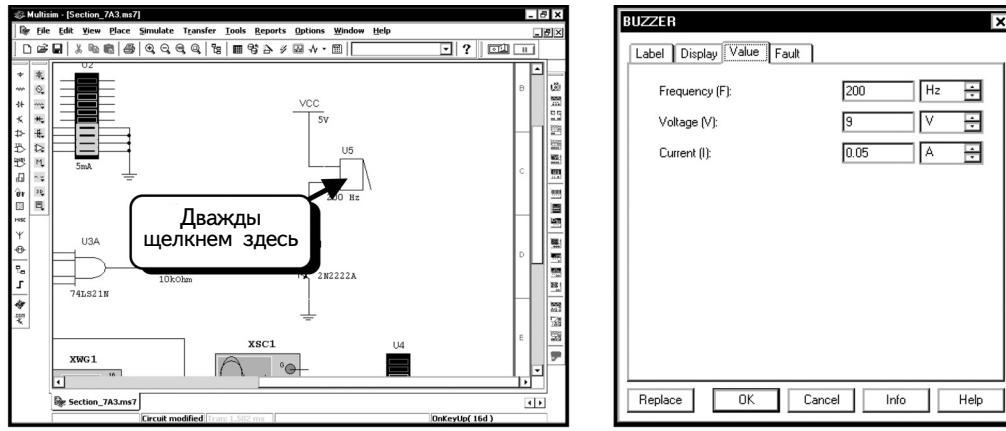


Транзистор 2N2222A входит в семейство NPN биполярных транзисторов; выберем семейство **BJT_NPN**:

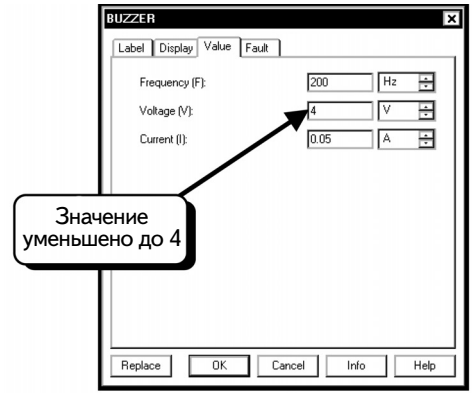


В этом диалоговом окне показан список всех доступных транзисторов NPN. Выделенный транзистор — это именно тот компонент, который нужен. Нажмем кнопку **OK**, чтобы добавить его в схему.

Теперь соединим все компоненты. Рассмотрим некоторые из них подробнее. Изменим настройки зуммера. Дважды щелкнем по его изображению, чтобы изменить параметры:



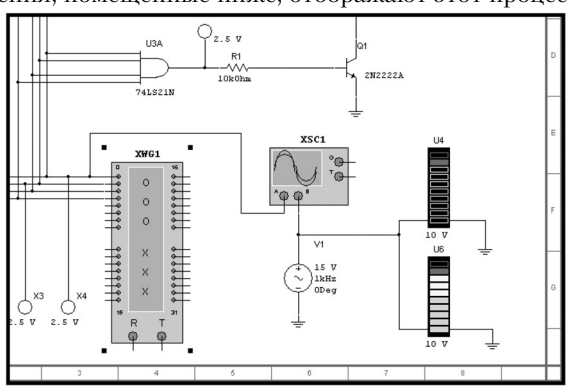
Частота зуммера равна 200 Гц, рабочее напряжение — 9 В при токе 50 мА. Изначально схема была настроена на напряжение 4 В; изменим его значение:

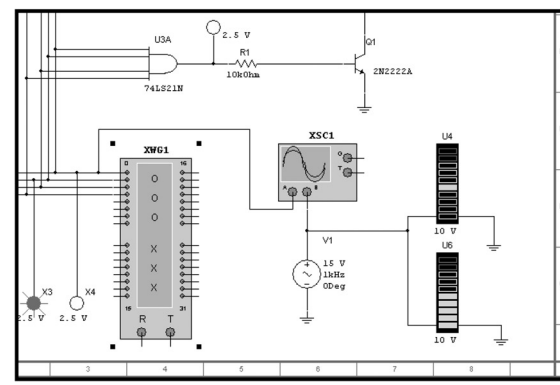


При желании можно изменить частоту и ток зуммера. Однако слишком большое значение тока может вызвать проблемы при работе с транзистором 2N2222A. Нажмем кнопку **OK**, чтобы принять изменения. Если инструмент **Word Generator** создаст код 1111, схема **И** определит это, и зуммер издаст сигнал.

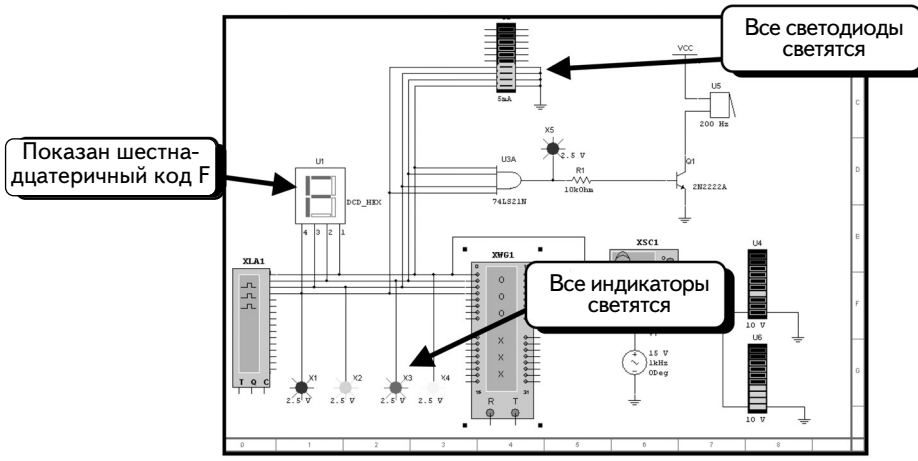
Компоненты **LVL_BARGRAPH** и **DCD_BARGRAPH** являются аналоговыми индикаторами. Это индикаторы с одним аналоговым входом, которые преобразуют входной сигнал в уровень столбика на дисплее. В них встроены логические схемы, позволяющие преобразовать аналоговый сигнал в десять цифровых сигналов, а также дополнительные схемы, отображающие логические сигналы на дисплее. Необходимо лишь поместить компоненты в схему и подключить входы к заземлению и измеряемому сигналу. В нашей схеме индикаторы подключены к синусоидальному источнику напряжения 15 В, поэтому показания будут изменяться в соответствии с синусоидой напряжения.

Перейдем теперь к моделированию. Нажмем кнопку **Cycle**. Каждый раз при считывании кода 1111 зуммер должен издавать звук. Высота столбиков в индикаторах повторяет изменения в синусоиде напряжения. Изображения, помещенные ниже, отображают этот процесс:

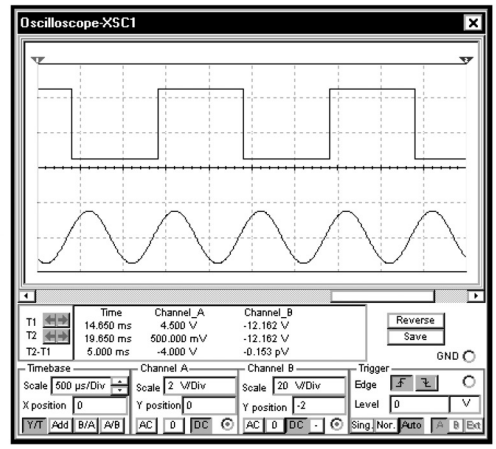




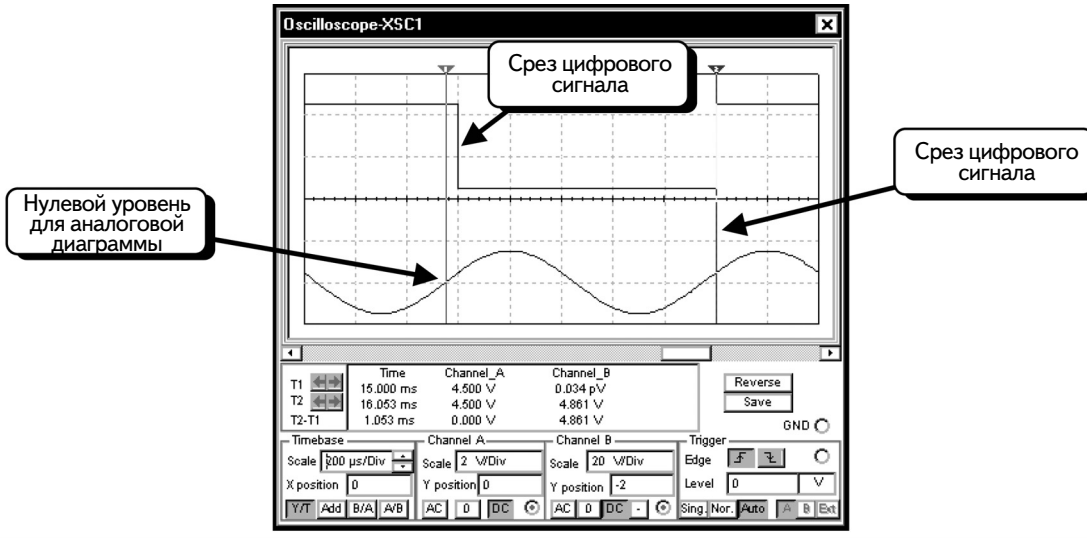
А если на экране возникнет картинка, приведенная ниже, зуммер должен издать сигнал:



Рассмотрим, наконец, временные диаграммы на экране осциллографа и осциллограммы. (Как работать с осциллографом рассказано в разделе 6.1):



Осциллограммы выполняют две функции. Во-первых, с помощью осциллографа можно измерить мгновенные значения сигналов в цифровой схеме. (Это полезно при соединении цифровой схемы с аналоговой.) Во-вторых, что надо подчеркнуть, источник напряжения переменного тока не синхронизирован с инструментом **Word Generator**. Если увеличить масштаб по оси времени и воспользоваться курсорами, то можно увидеть, что границы окна инструмента **Word Generator** не совпадают с нулевыми значениями источника переменного напряжения:



Курсор 1 (красный) располагается в нулевой точке аналоговой осциллограммы. Курсор 2 (синий) совпадает с фронтом цифрового сигнала. Для синхронизации **Word Generator** с моментами перехода источника переменного напряжения через нулевые значения, необходимо создать дополнительную схему.

7.2. Схемы, содержащие аналоговые и цифровые модели

Сначала рассмотрим схему, содержащую ОУ и JK-триггер:

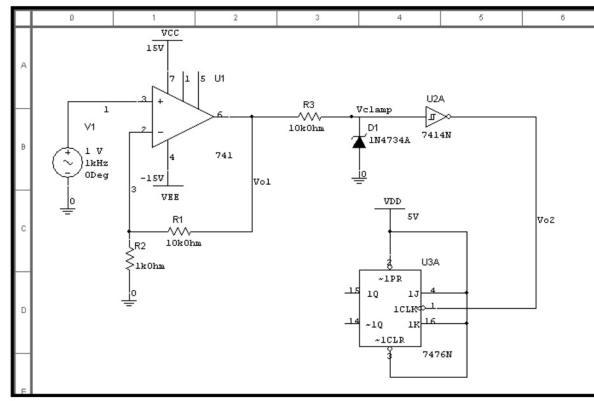
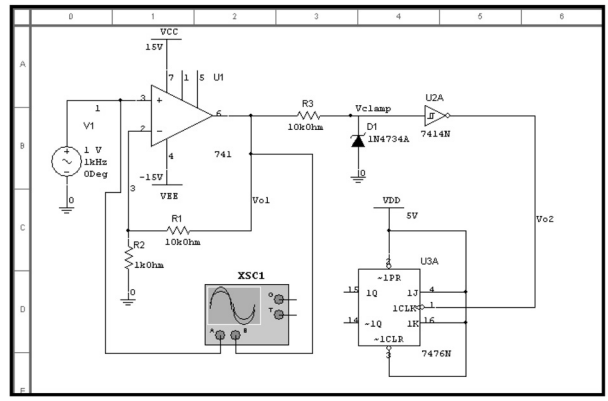


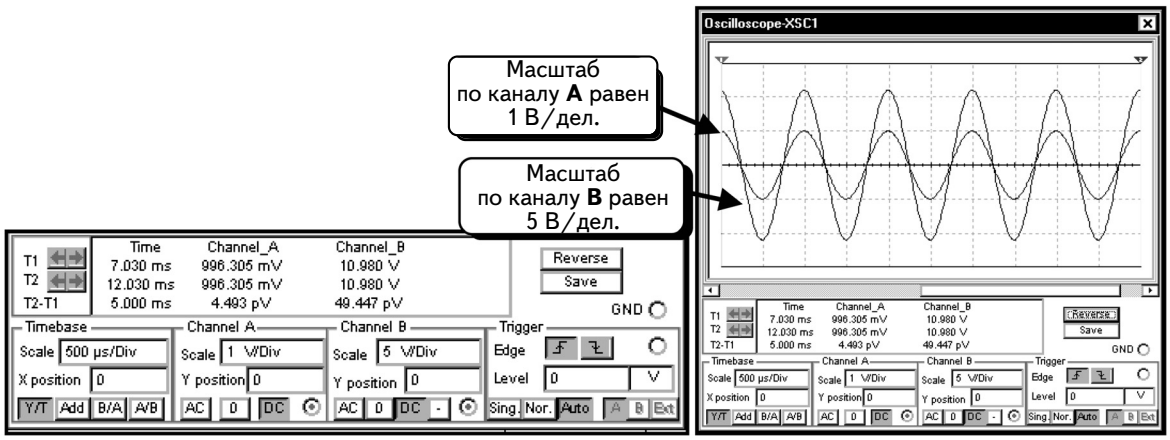
Схема в точности повторяет реальное устройство, созданное в лаборатории. Между аналоговой схемой и цифровыми компонентами не нужно добавлять согласующие элементы. Обратите внимание: на входы J и K триггера подано достаточно высокое напряжение, чтобы триггер переключался на каждом срезе запускающего импульса.

Источник синусоидального напряжения создает синусоиду частотой 1 кГц, мгновенные значения которой изменяются от –1 до 1 В. Коэффициент усиления схемы, собранной на ОУ **741,** равен 11, поэтому на выходе ОУ (на узле **Vo1**) формируется кривая с частотой 1 кГц, изменяющаяся в диапазоне ±11 В . На выходе ограничителя, собранного на стабилитроне (узел **Vclamp**), напряжение изменяется в диапазоне от +5,6 до –0,7 В. Этот сигнал совместим с уровнями напряжения компонентов TTL и может быть подан на вход триггера Шмитта (7414). Выходное напряжение триггера Шмитта (узел **Vo2**) — кривая с частотой 1 кГц, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 5 В. Схема JK-триггера представляет собой делитель частоты с коэффициентом деления 2 (divide-by-two counter), следовательно, его выходной сигнал Q должен иметь частоту 500 Гц и изменяться в диапазоне от 0 до 5 В. Сигнал смещен по фазе на 180° относительно входного сигнала.

Выполним моделирование и получим осциллограммы. Подключим осциллограф:

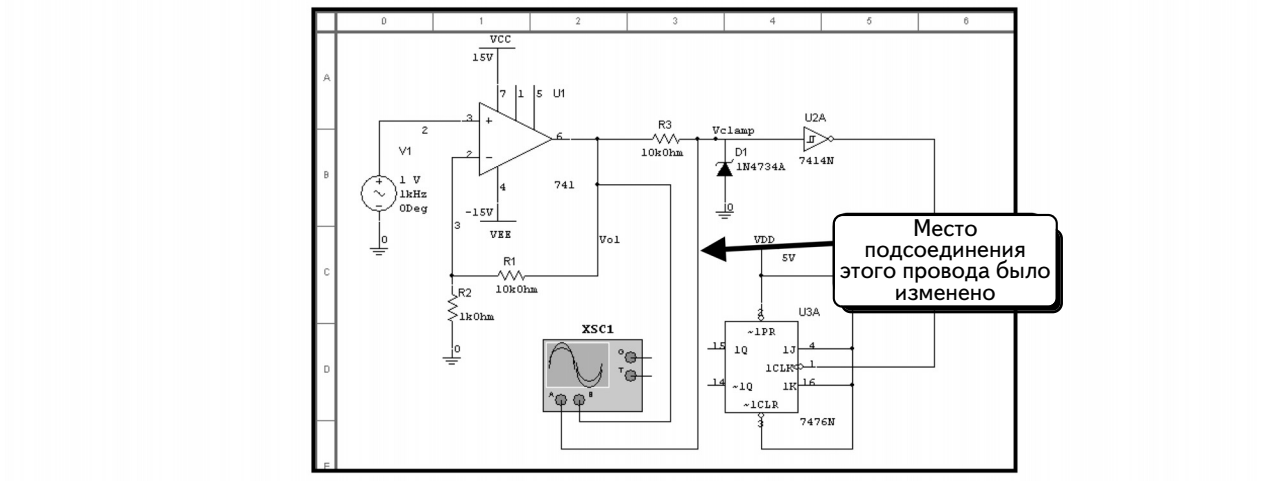


Сначала получим осциллограммы входного и выходного напряжений ОУ 741. Схема имеет усиление 11, следовательно, выходное напряжение должно быть в фазе с входным напряжением и превышать его в 11 раз. Щелкнем кнопку **Run** , чтобы начать моделирование. Дважды щелкнем по изображению осциллографа, чтобы открыть соответствующее окно. Изменим настройки осциллографа, как показано ниже (Если вы не умеете пользоваться осциллографом, обратитесь к разделу 6.1.):

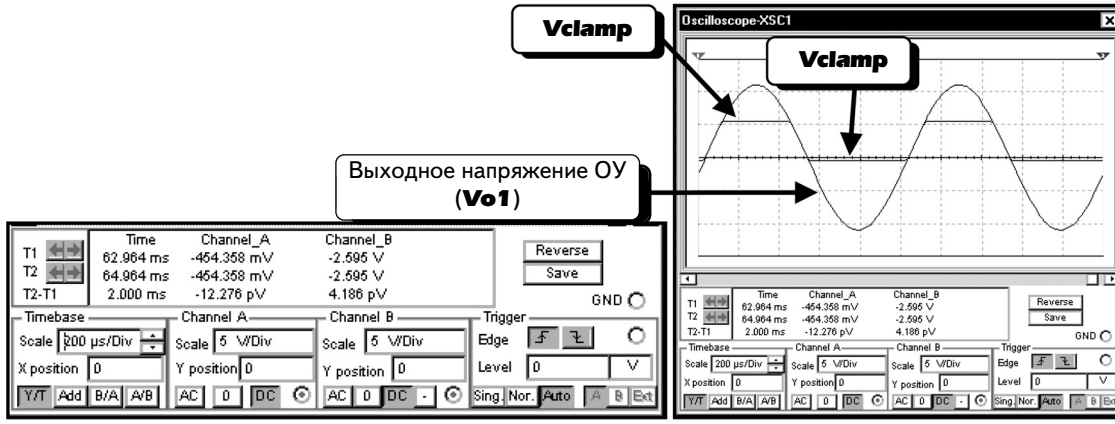


Мы видим, что амплитуда входного сигнала (канал **A**) равна 1 В, а амплитуда выходного (канал **B**) составляет 11 В. Чтобы измерить амплитуду выходного напряжения, можно воспользоваться курсорами, однако достаточно ограничиться визуальной оценкой. Как оказалось, усилитель на ОУ работает правильно.

Переключим теперь вход **A** на стабилитрон (узел **Vclamp**):

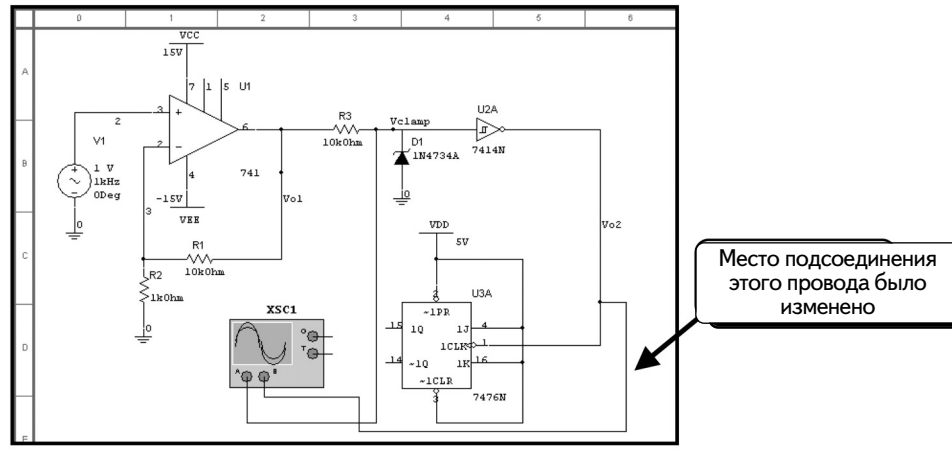


Повторим моделирование и рассмотрим осциллограммы:

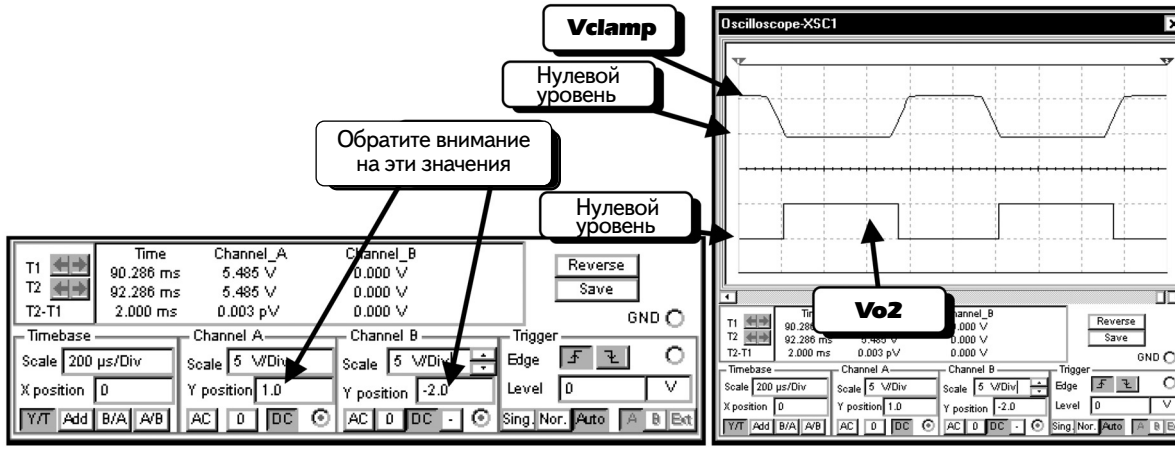


Для обоих каналов используем масштаб 5 В/дел. Видно, что стабилитрон ограничивает напряжение диапазоном от 5 до –0,7 В, как и ожидалось.

Переключим вход **B** на выход триггера Шмитта 7414 (узел **Vo2**), как показано ниже:

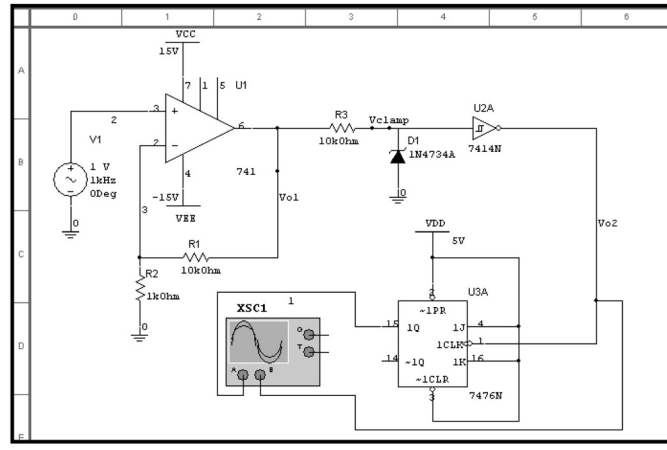


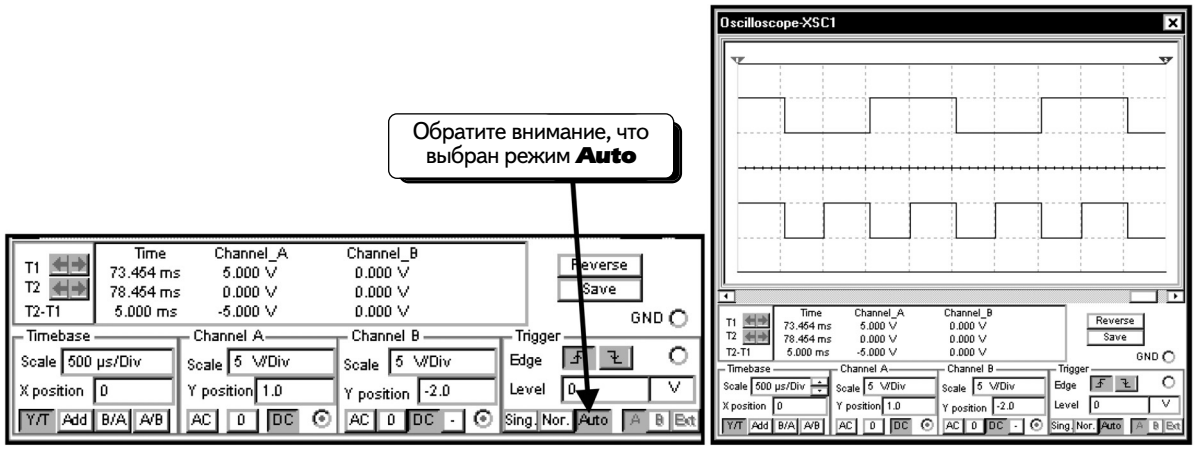
Осциллограммы показаны ниже:



Обратите внимание: были изменены значения **Y position** инструмента **Oscilloscope**, чтобы разнести две кривые по вертикальной оси. Видно, что триггер Шмитта преобразует входное напряжение, имеющее плавное нарастание и спад, в импульс с очень крутыми фронтами. Именно для этого в схему введен триггер Шмитта. Теперь его выходной сигнал можно использовать в цифровых схемах, например, в качестве сигнала синхронизации триггера.

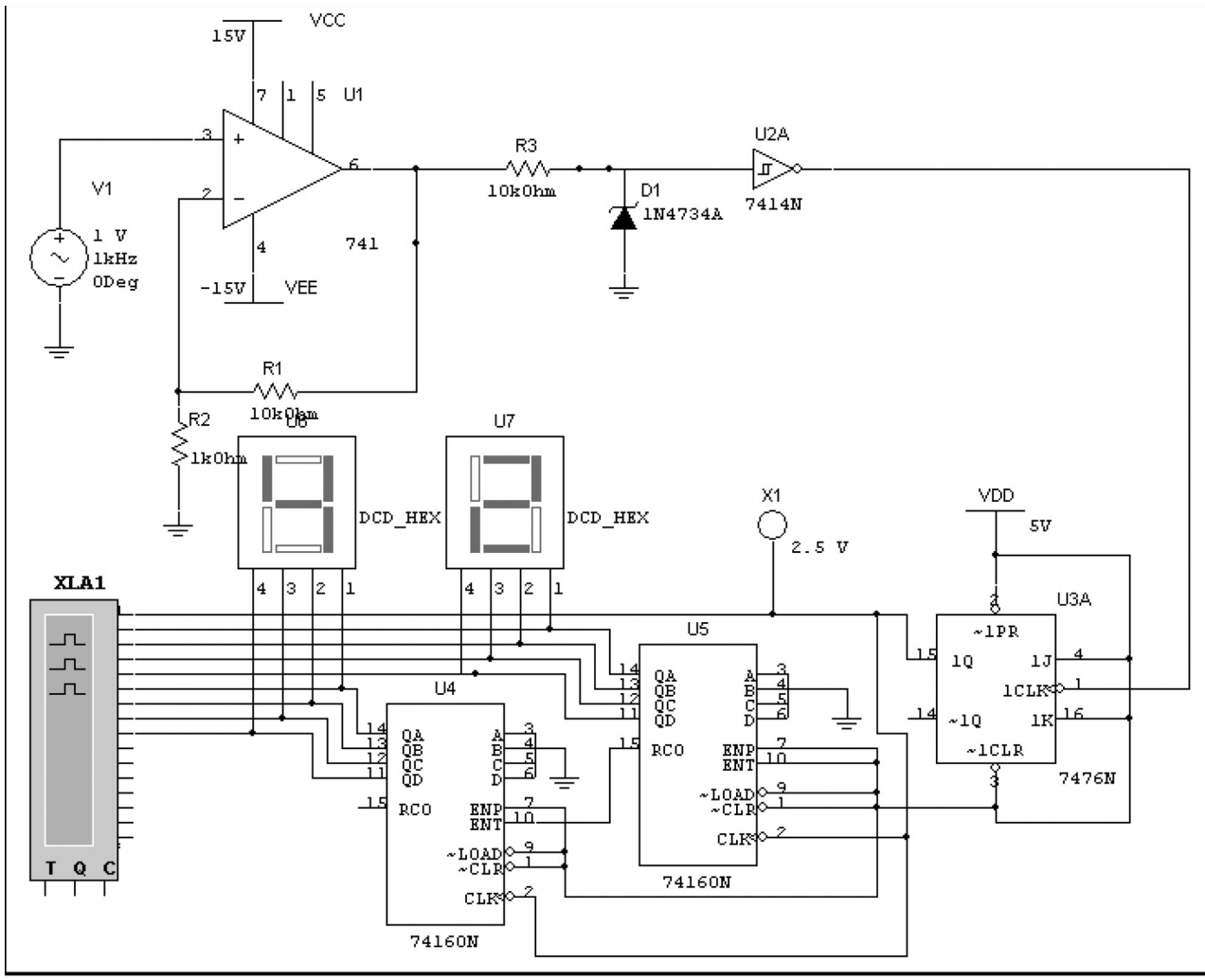
Рассмотрим выходной сигнал JK-триггера. Триггер реализует функцию деления на два, поэтому выходной сигнал Q представляет собой кривую с частотой, которая в два раза меньше частоты сигнала синхронизации. Изменим подключение осциллографа и получим осциллограммы:





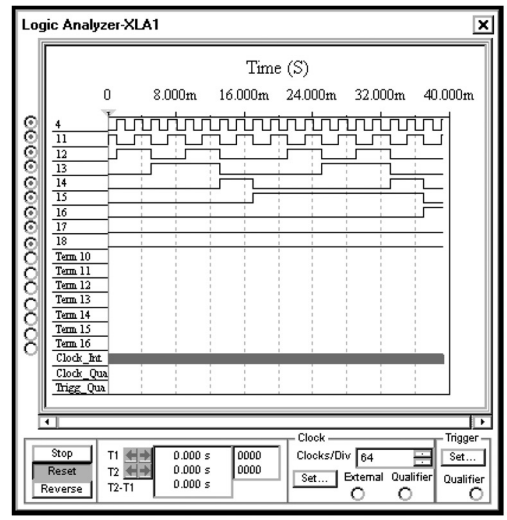
Если запуск осциллографа настроен на нормальный режим, необходимо установить уровень запуска в диапазоне от 0 до 4 В. Если этого не сделать, осциллограф не будет запускаться, потому что ни одно из входных напряжений не имеет отрицательного значения (настройка запуска по умолчанию). Запуск осциллографа был переведен в автоматический режим, чтобы упростить создание осциллограмм. Однако теперь видно, что осциллограммы «бегут» по экрану. Переведем запуск осциллографа в нормальный режим и установим уровень запуска равным 1 В.

Во втором примере смоделируем следующую схему:



В схеме будем использовать напряжение с выхода Q триггера 7476 в качестве сигнала синхронизации для двух счетчиков 74160. Это — десятичные счетчики, которые выполняют счет от 0 до 9. При применении двух устройств можно осуществить счет от 0 до 99. Если нажать кнопку **Run/stop simulation** , то увидим, что счет выполняется именно в этом диапазоне.

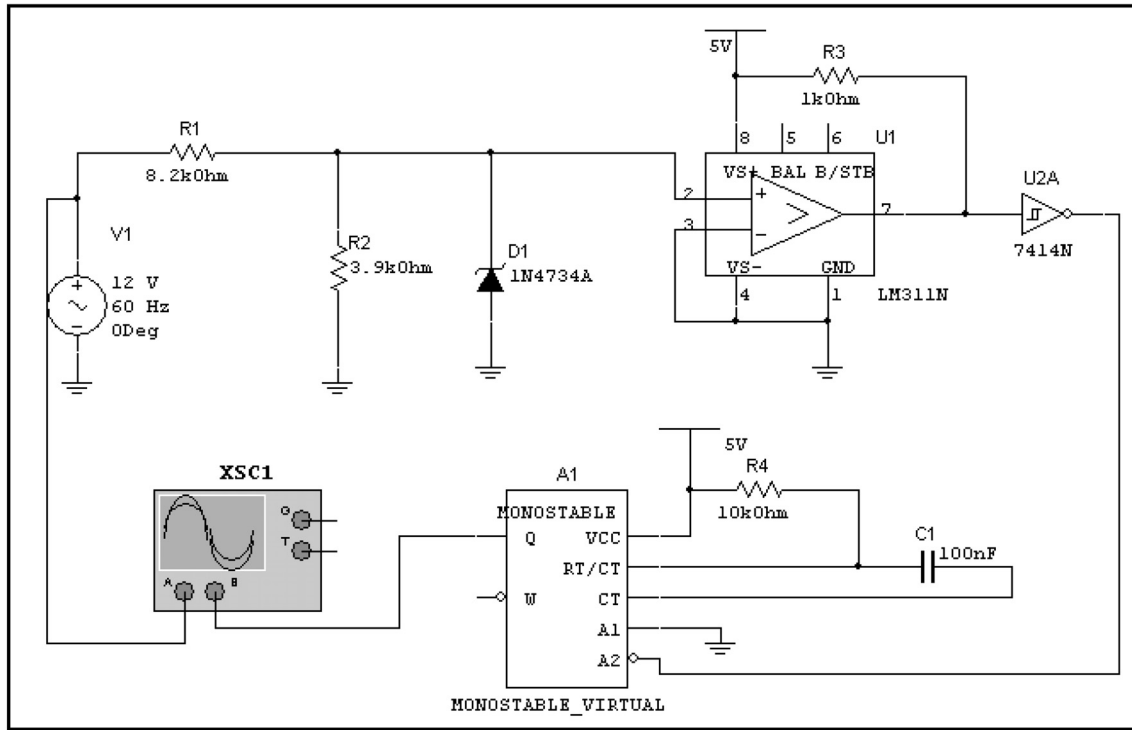
Подключим логический анализатор (**Logic Analyzer**), чтобы просматривать диаграммы логических сигналов, примеры которых даны ниже:

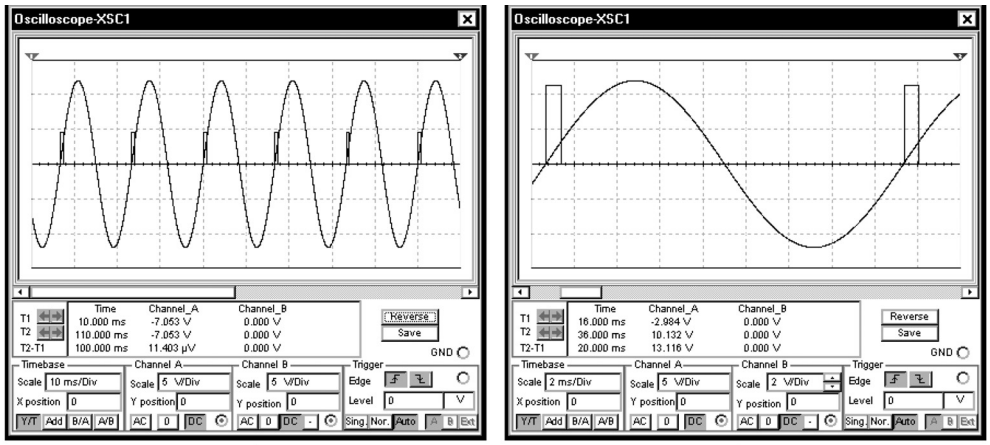


Обратите внимание: частота таймера анализатора **Logic Analyzer** составляет 16 кГц (чтобы изменить настройку, надо нажать кнопку **Set**). Для параметра **Clocks/Div** было выбрано значение 64.

УПРАЖНЕНИЕ 7-1: Создайте схему синхронизации с частотой сети 60 Гц. Входное напряжение схемы представляет собой синусоиду с амплитудой 12 В и частотой 60 Гц. Выходное напряжение схемы — это импульс длительностью 1 мс и амплитудой 5 В, который возникает в момент пересечения кривой нулевого значения в положительном направлении.

РЕШЕНИЕ: программа Multisim не имеет компонентов 74xx123. На панели **Mixed** имеется компонент, который очень близок к компонентам 74xx123, его мы и добавим в схему:

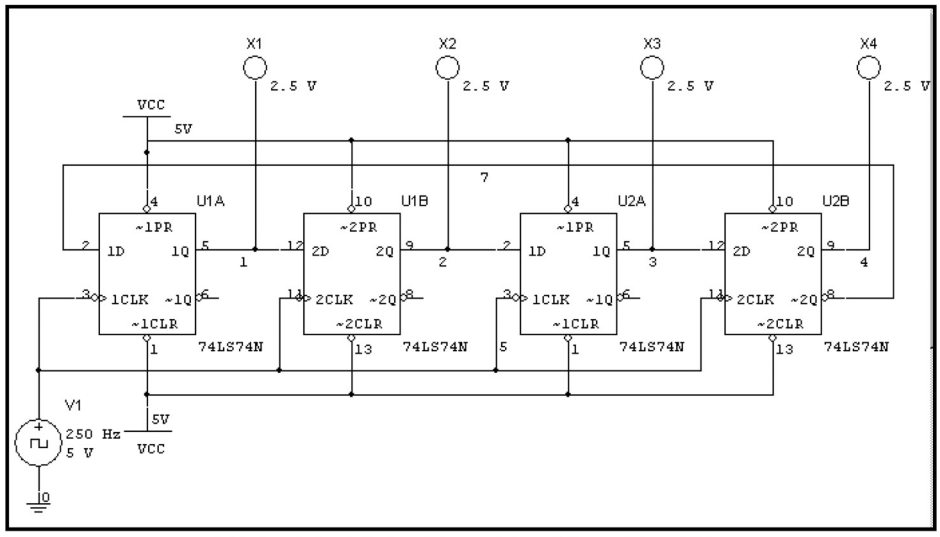




Из осцилограмм выше видно, что ширина импульса не равна 1 мс. Можно увеличить ширину импульса, увеличив сопротивление резистора **R3** или емкость конденсатора **C1**.

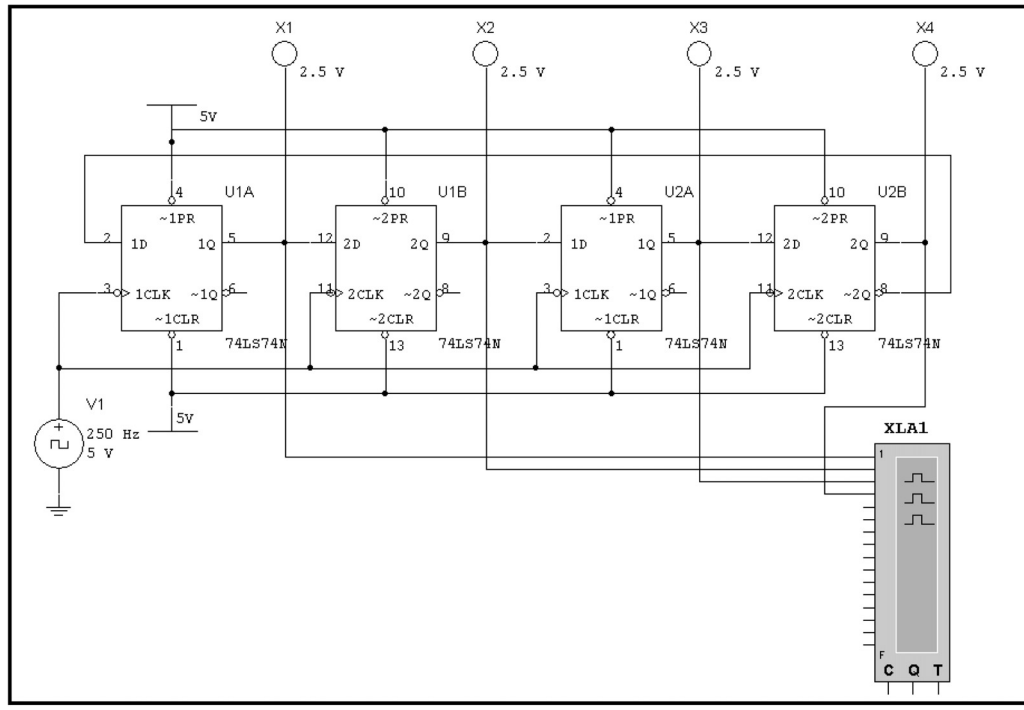
7.3. Моделирование схем, содержащих только цифровые компоненты

Можно использовать программу Multisim и для моделирования схем, содержащих только цифровые компоненты. Исследуем схему счетчика Джонсона:

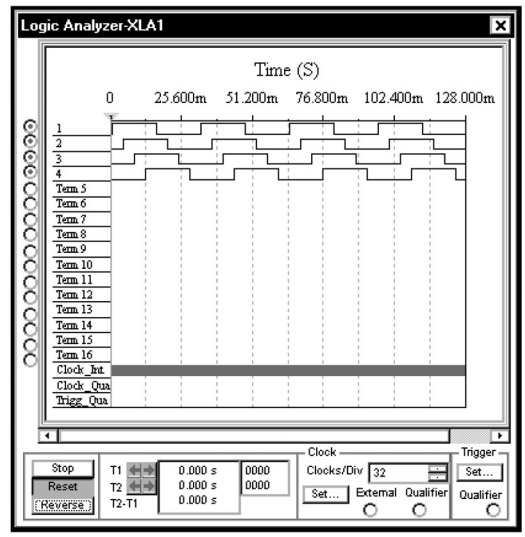


Отметим, что схема не содержит источников питания и заземления. Программа Multisim подключит эти компоненты автоматически. В программе два режима моделирования схем с цифровыми компонентами: идеальный и стандартный. Идеальный режим работает быстрее, т. к. не нужно задавать параметры источников питания и заземления, но при этом не учитываются колебания напряжения источника питания, допуски устройств, время нарастания и спада. В идеальном режиме необходимо задавать время задержки. Реальный режим обеспечивает более точное моделирование, но требует наличия цифрового заземления ( ) и источника питания ( ). По умолчанию моделирование выполняется в идеальном режиме. Для переключения в реальный режим следует выбрать соответствующую опцию; здесь не будем говорить об этом. Различие между режимами будет описано в разделе 7.5.

Если вы знакомы с принципом работы счетчика Джонсона, то нажмите кнопку **Run** и проверьте правильность работы схемы с помощью пробников. Чтобы продемонстрировать функционирование схемы подключим инструмент **Logic Analyzer** и исследуем диаграммы:

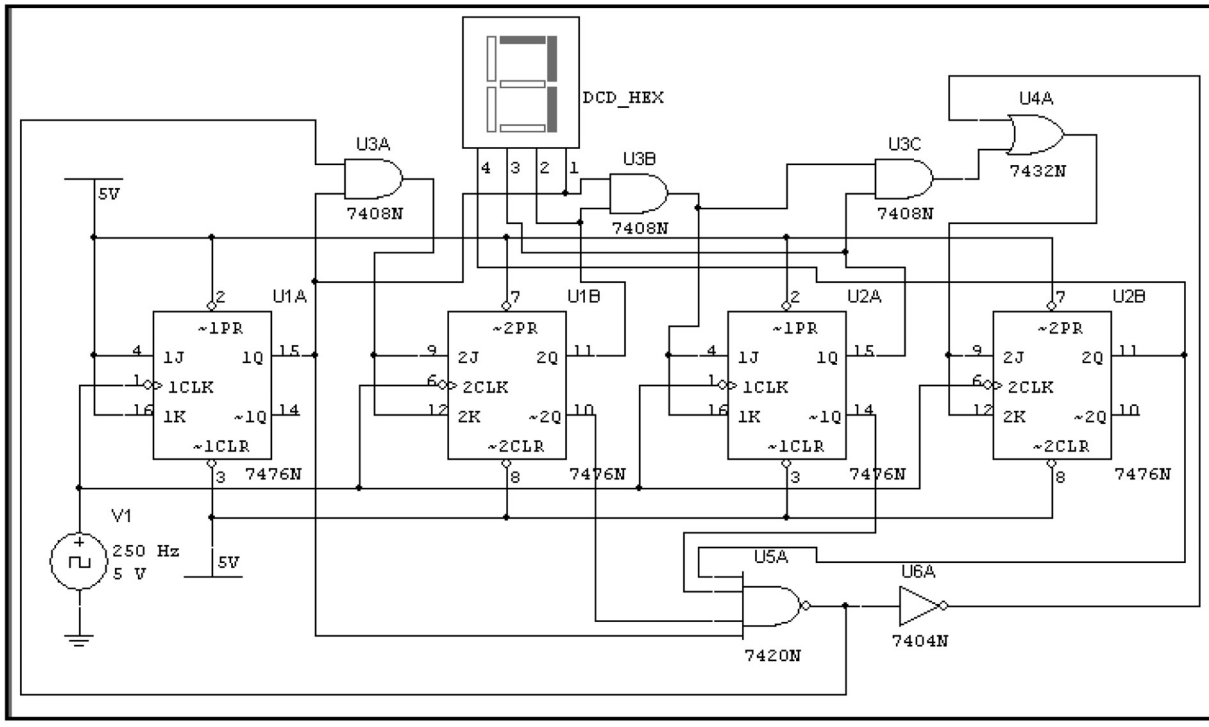


Благодаря инструменту **Logic Analyzer** можно без труда определить, правильно ли функционирует схема. Частота синхронизации **Logic Analyzer** составляет 2,5 кГц:



УПРАЖНЕНИЕ 7-2: Создайте и исследуйте работу схемы 4-разрядного десятичного счетчика.

РЕШЕНИЕ: Создайте схему, показанную ниже. Используйте таймер на 250 Гц.



После нажатия кнопки **Run/stop simulation** данные на экране алфавитно-цифрового дисплея будут изменяться от 0 до 9. Отметим, что это не единственное решение задачи. Вид вашей схемы может отличаться.

УПРАЖНЕНИЕ 7-3: Создайте и исследуйте схему, которая использует в качестве таймера мультивибратор 555 и десятичный счетчик для запуска дешифратора.

РЕШЕНИЕ: Соберите следующую схему:

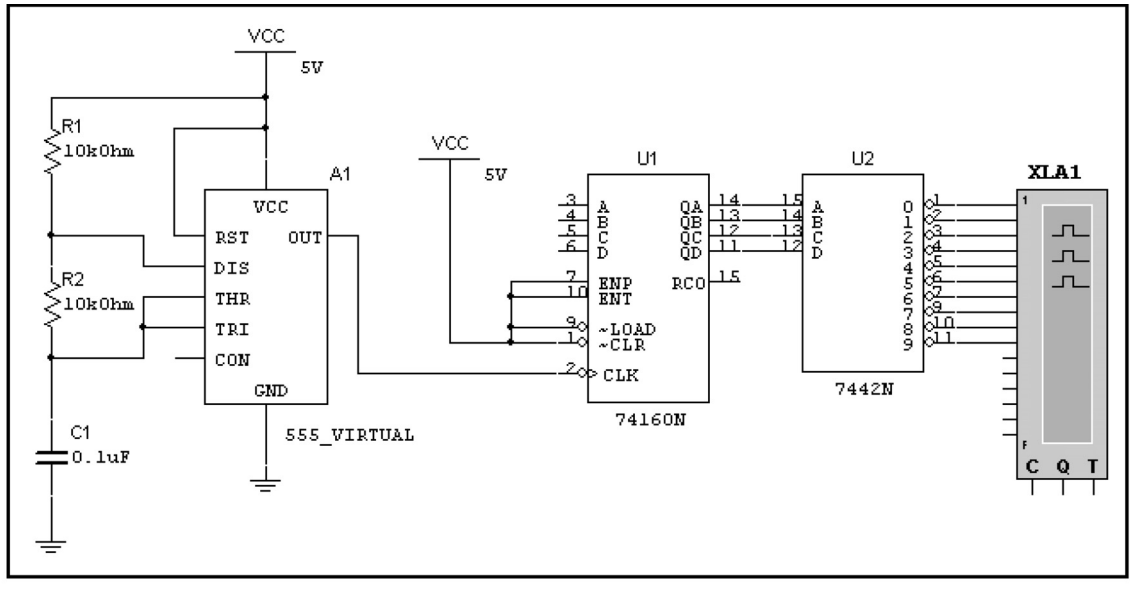
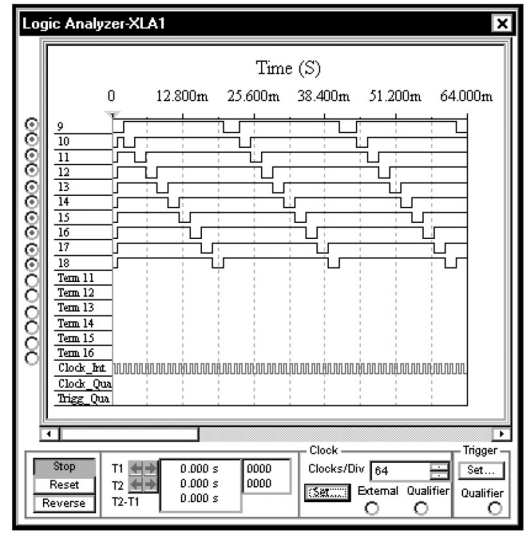
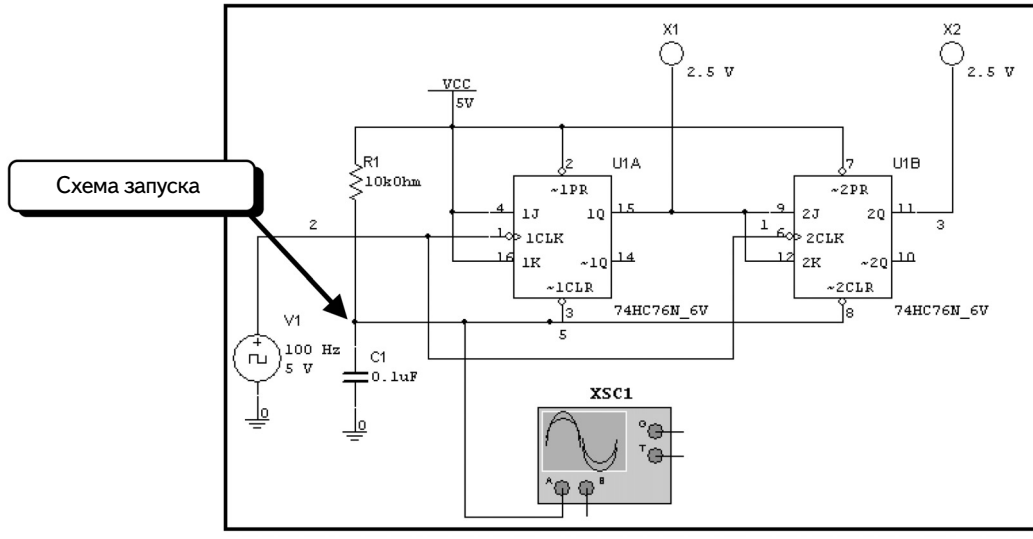


Схема формирует сигналы на большом числе выводов, поэтому исследовать ее работу лучше всего с помощью анализатора **Logic Analyzer**:



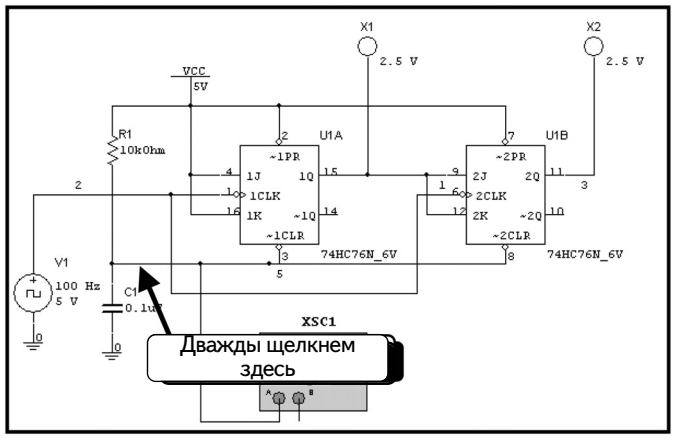
7.4. Схема с обнулением при запуске

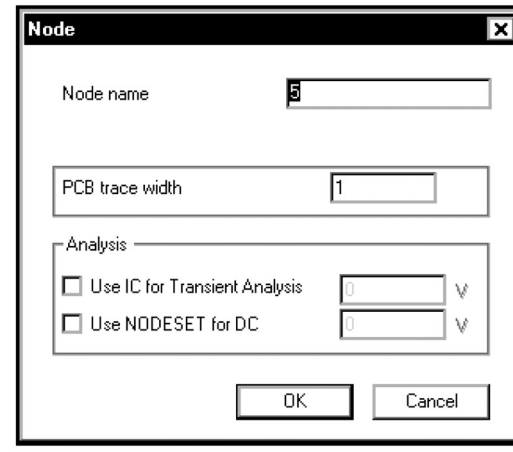
Начальное состояние триггера в модели Multisim не всегда известно. Здесь будет рассказано о методике, которая используется для инициализации триггеров в моделях и создаваемых схемах. Она полезна еще и потому, что реальные триггеры не настраиваются на определенное состояние при запуске, поэтому приходится добавлять схему, которая обнуляет триггеры и настраивает начальное состояние модели. Можно использовать следующую схему, чтобы обнулить триггер в начале моделирования. Далее будет показано, как обнулить два триггера.



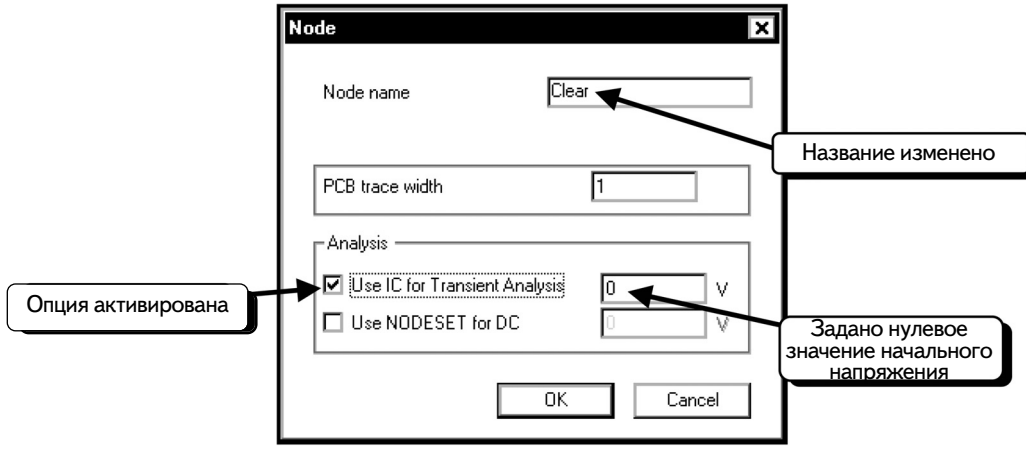
Резистор **R1** и конденсатор **C1** формируют схему инициализации. Начальное напряжение конденсатора составляет 0 В. Во время моделирования конденсатор заряжается от 0 (логический «0») до 5 В. Если напряжение конденсатора близко к 0, на входе сброса триггера формируется сигнал логического нуля и триггер сбрасывается. После запуска моделирования конденсатор заряжается до 5 В, формируя сигнал логической «1» на входе сброса триггера, и до окончания моделирования сброса больше не происходит.

Чтобы указать начальное состояние для виртуальной модели, дважды щелкнем по проводу:

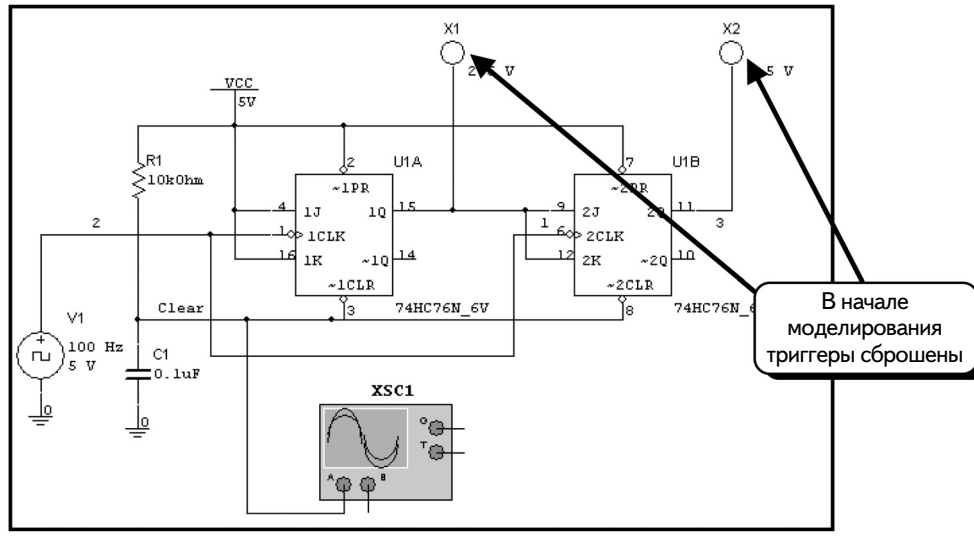




Изменим параметр ***Node name*** **(Название узла)** на `Clear`, активируем опцию ***Use IC for Transient Analysis*** **(Использовать IC для анализа переходных процессов)** и установим нулевое начальное состояние:

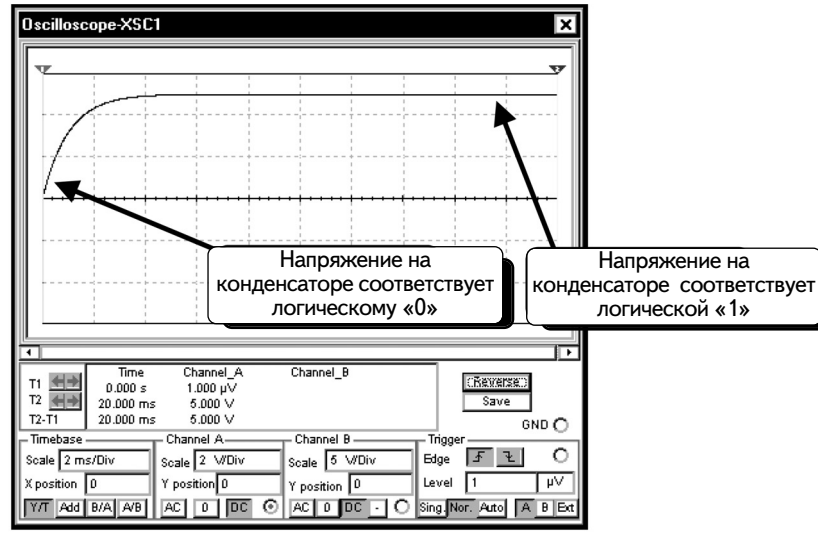


Нажмем кнопку ***OK***, чтобы принять изменения. При моделировании начальное состояние триггеров будет обнулено. В этой схеме после обнуления триггеры начинают отсчет, т. к. подключены к 2-разрядному счетчику:



Если несколько раз начать и остановить моделирование, то видно, что вначале триггер всегда сбрасывается в нулевое состояние. Если же отключить опцию ***Use IC for Transient Analysis***, опять начать и остановить моделирование, то начальное состояние пробников может быть произвольным.

Далее воспользуемся осциллографом и измерим напряжение конденсатора (при условии, что опция **Use IC for Transient Analysis** была включена). Осциллограмма напряжения на конденсаторе при первом запуске моделирования показана ниже:



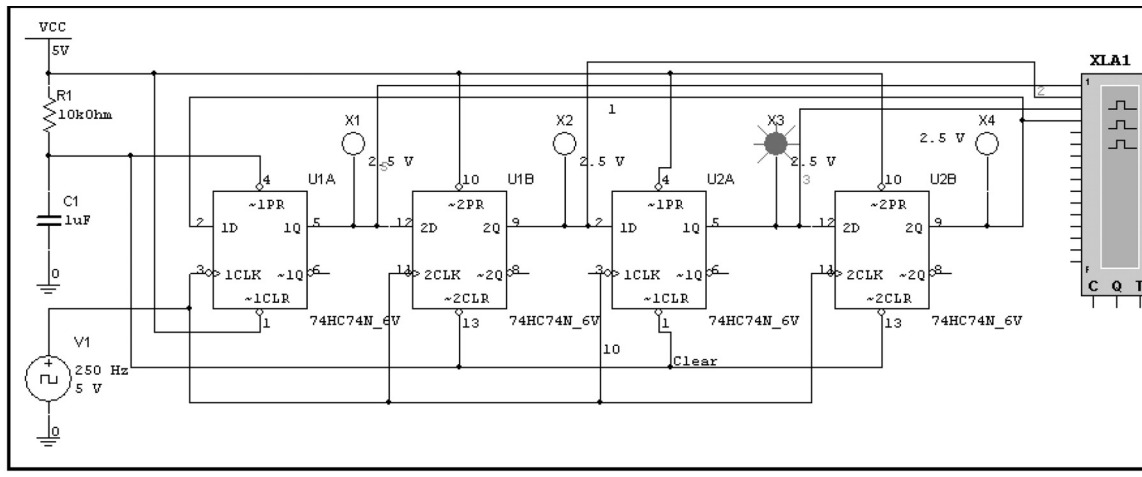
Как показывает осцилограмма, что в начале моделирования напряжение конденсатора близко к 0. Низкое напряжение конденсатора сохраняется достаточно долго, чтобы триггеры успели среагировать на нулевой сигнал и обнулить начальное состояние. Далее в процессе моделирования напряжение на конденсаторе обеспечивает сигнал логической «1» на входе сброса, и триггеры не сбрасываются, так как активным является низкий логический уровень.

Особенность данной схемы заключается в том, что постоянная времени R_1C_1 должна быть достаточно велика, чтобы конденсатору потребовалось много времени на зарядку. Чем больше величина **R1C1**, тем дольше сохраняется низкое напряжение конденсатора, и тем дольше триггеры будут реагировать на низкое напряжение на входах сброса. Если величина **R1C1** слишком мала, переход будет очень быстрым, и не все триггеры успеют среагировать на низкое входное напряжение. Более эффективный метод состоит в том, чтобы использовать RC-цепочку для запуска одновибратора. Одновибратор при этом формирует фиксированный импульс, который обнуляет все триггеры.

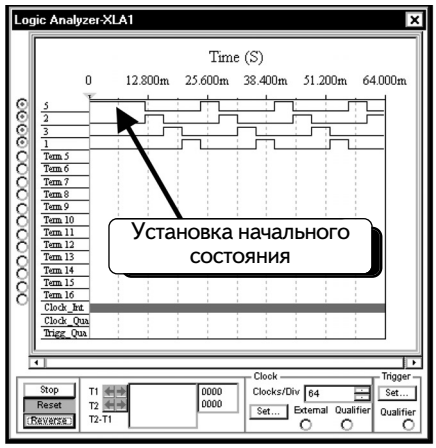
Схема запуска работает только при включении питания, потому что до этого конденсатор разряжается до 0 В. Во время работы схемы не удастся разрядить конденсатор, если только не добавить дополнительную схему. Таким образом, данная схема способна воздействовать на модель только в момент включения питания.

УПРАЖНЕНИЕ 7-4: Создайте и исследуйте схему 4-разрядного счетчика. Начальное состояние должно отражаться двоичным кодом 1000.

РЕШЕНИЕ: Соберите следующую схему. Добавьте конденсаторную схему начальной установки, которая устанавливала бы первый триггер в 1, а остальные триггеры — в 0. Обратите внимание: начальное напряжение конденсатора равно 0:



Во время моделирования светящийся пробник перемещается по схеме слева направо. Можно воспользоваться анализатором **Logic Analyzer**, чтобы просмотреть состояние триггеров:



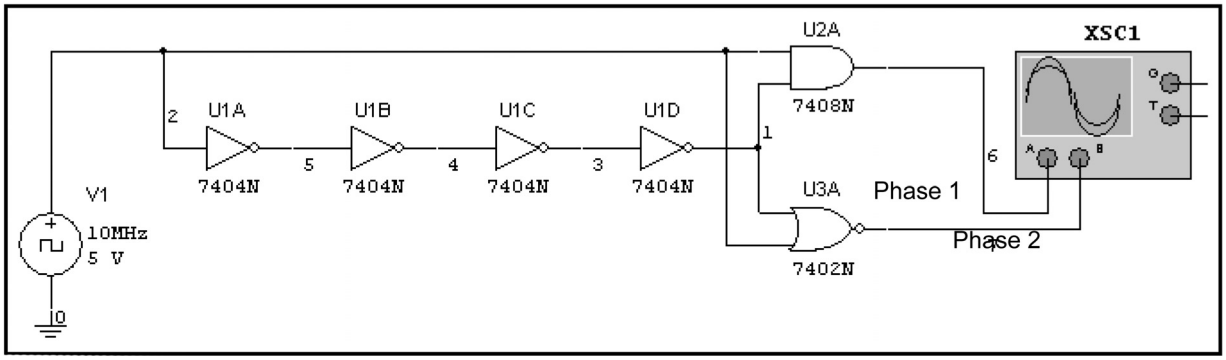
Видно, что в каждый из моментов времени только один триггер имеет значение 1, и это значение передается от одного триггера другому. Состояние предустановки триггеров продолжается дольше, чем любое другое состояние.

7.5. Цифровое моделирование и задержки на логических элементах в идеальном и реальном режимах

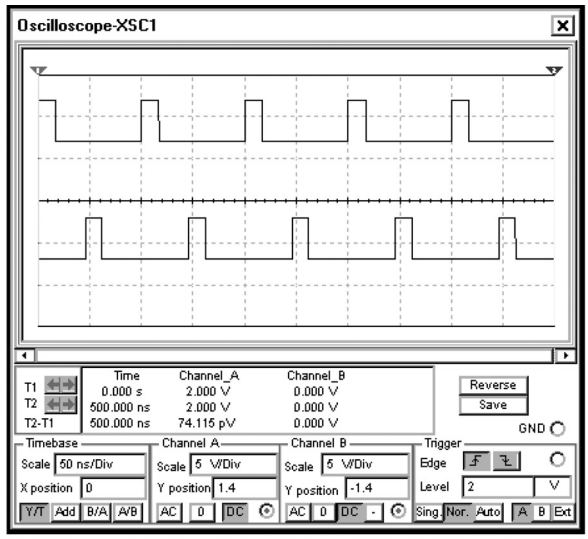
Программа Multisim позволяет моделировать задержки на логических элементах (gate delays) в цифровых моделях. Чтобы продемонстрировать наличие задержек, создадим схему с двухфазным таймером. Для моделирования будем использовать идеальный и реальный режимы Multisim. В обоих режимах присутствует задержка на логическом элементе. В идеальном режиме выходной сигнал логического элемента представляется прямоугольным напряжением с бесконечно крутыми фронтами. Моделируется только время задержки между входным и выходным сигналами. В реальном режиме, кроме этой задержки, моделируется также время повышения и спада, причем выходное напряжение имеет сглаженные фронты. Моделирование в реальном режиме требует больше времени.

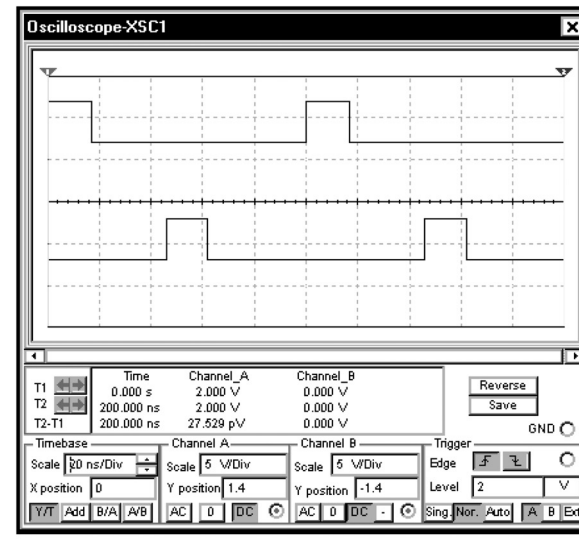
7.5.1. Цифровое моделирование в идеальном режиме

По умолчанию цифровое моделирование выполняется в идеальном режиме. В предыдущих примерах моделирование велось в идеальном режиме, следовательно, не нужно ничего менять. В идеальном режиме можно использовать любой из двух типов заземления ( или ) . Создадим схему с двухфазным таймером:

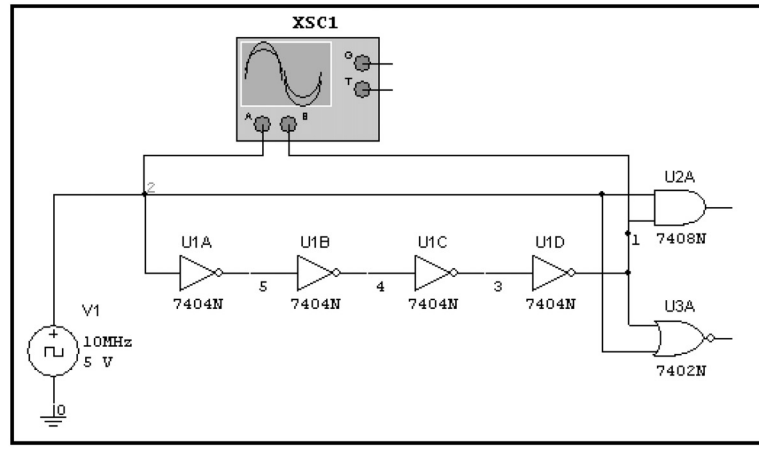


Выходной сигнал инвертора U1D не отличается от входного U1A. Единственное отличие между ними — это время задержки на четырех инверторах. Так как задержка логического элемента измеряется в наносекундах, установим частоту таймера на 10 МГц. Получим осциллограммы выходных сигналов **Phase 1** и **Phase 2**. На экране показаны два окна осциллографа с одной осциллограммой, отображенной при различных масштабах по оси времени:

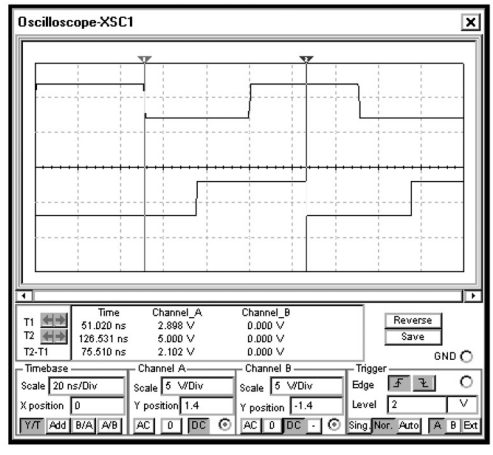


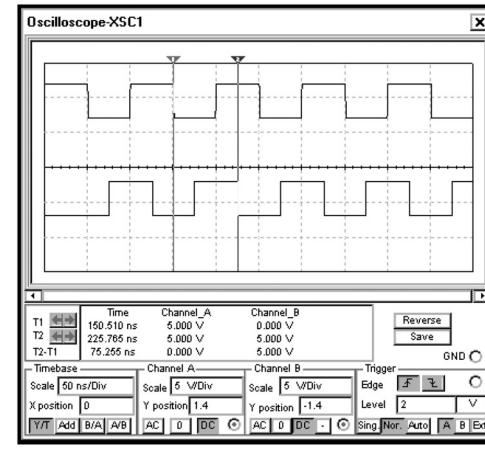


Как видим, при каждом импульсе таймера на 10 МГц схема создает два смещенных по фазе импульса. Смещение вызвано задержкой сигнала на четырех инверторах. Подключив осциллограф, как показано ниже, можно измерить задержку на инверторах:



С помощью курсоров осциллографа измерим задержку на четырех инверторах. Как работать с курсорами осциллографа, описано в разделе 6.1.4. Ниже даны осциллограммы при различных масштабах по оси времени:

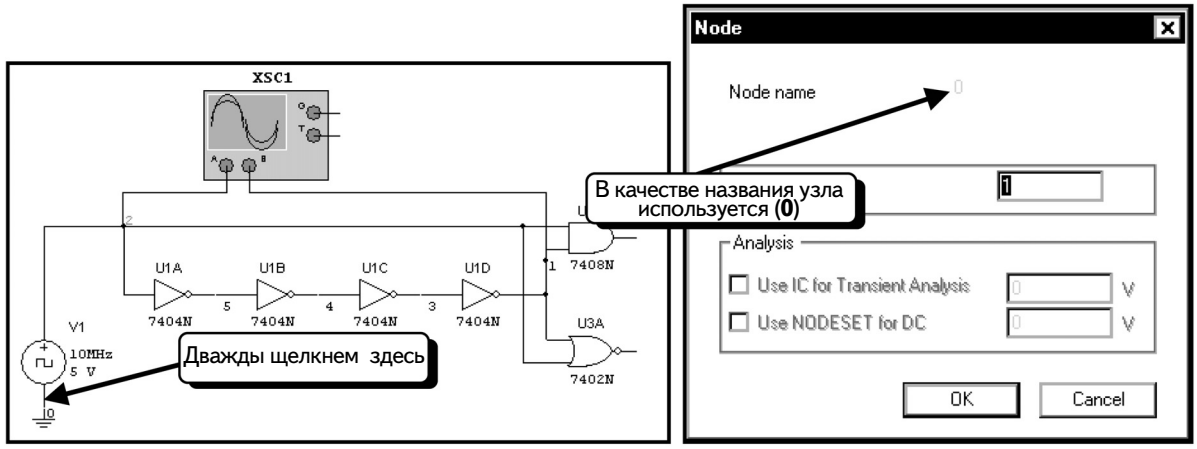




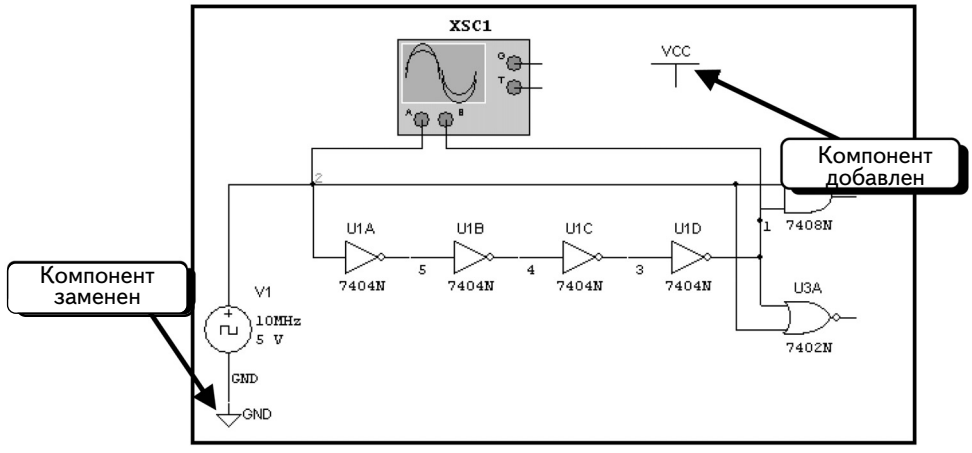
Задержка на четырех инверторах составляет около 75 нс, что соответствует задержке одного инвертора в 19 нс.

7.5.2. Цифровое моделирование в реальном режиме

В предшествующих примерах, было показано, что осциллограммы напряжений имеют прямоугольную форму. При реальном режиме моделирования время задержки устройств моделируется правильно, но осциллограммы выходных напряжений не имеют прямых углов. Исследуем ту же схему, что и в разделе 7.5.1, несколько изменив ее, чтобы она могла функционировать в реальном режиме. Рассмотрим сначала символ аналогового заземления. Дважды щелкнув по проводу заземления , можно увидеть, что узел заземления имеет обозначение «0»:

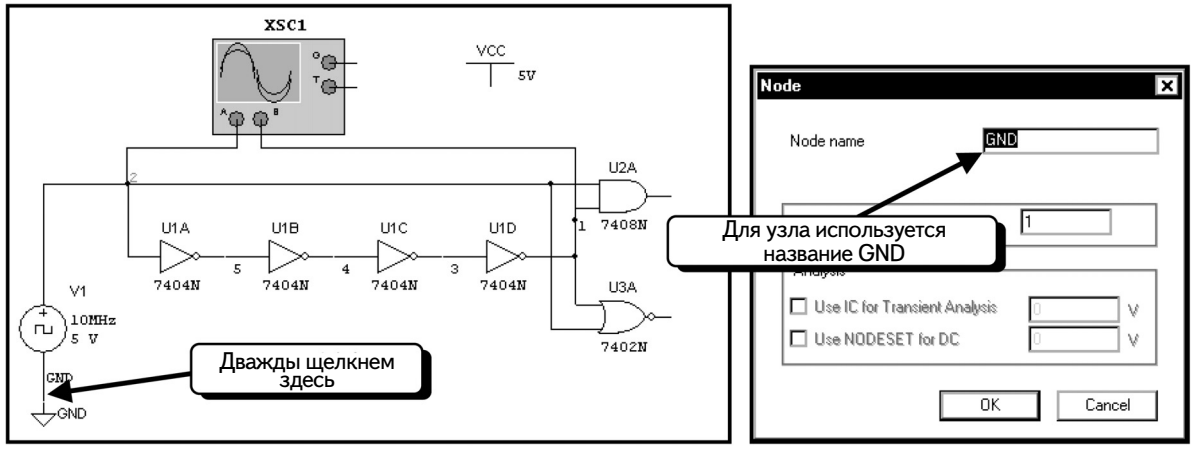


Название узла выделено зеленым цветом, и его довольно сложно разглядеть на приведенном изображении. В моделях Spice для узла заземления используется стандартное обозначение 0. При моделировании в реальном режиме надо выбрать цифровое заземление. Изменим схему так, как показано ниже:



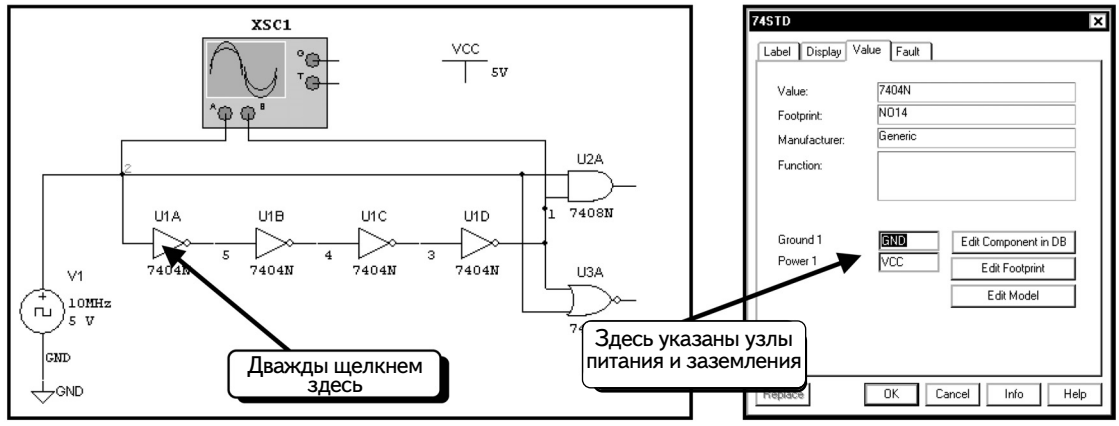
В схему был введен также источник питания Vcc. В аналоговых схемах к этому источнику питания с указанным напряжением этот подключались другие элементы. Здесь компонент Vcc не подключен к схеме, но он настраивает узел **VCC** на напряжение **5** В. Все цифровые схемы автоматически подключаются к данному узлу даже несмотря на то, что на схеме отсутствуют соответствующие провода. Это значит, что достаточно добавить узел в схему. Так как логические элементы соединены с узлом VCC, данный компонент подключен ко всем логическим элементам схемы.

Кроме того, было заменено аналоговое заземление цифровым . Если щелкнуть по проводу заземления, виден другой символ:



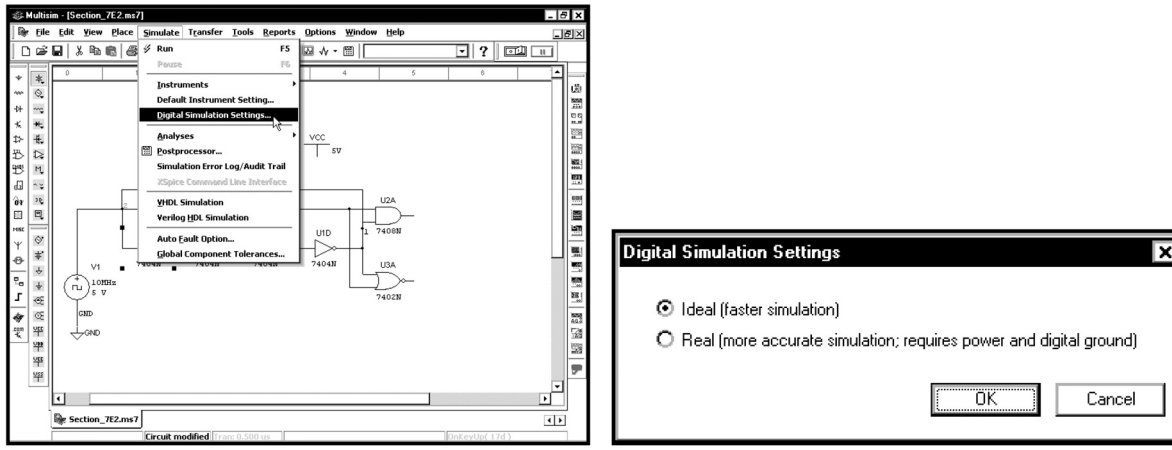
Теперь узел заземления называется **GND**, а не **0**. В реальном режиме по умолчанию для питания и заземления используются узлы **VCC** и **GND**. Можно изменить названия узлов, но не будем это делать.

Дважды щелкнем по цифровому компоненту, например по инвертору:

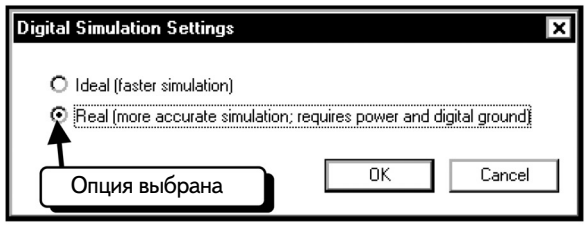


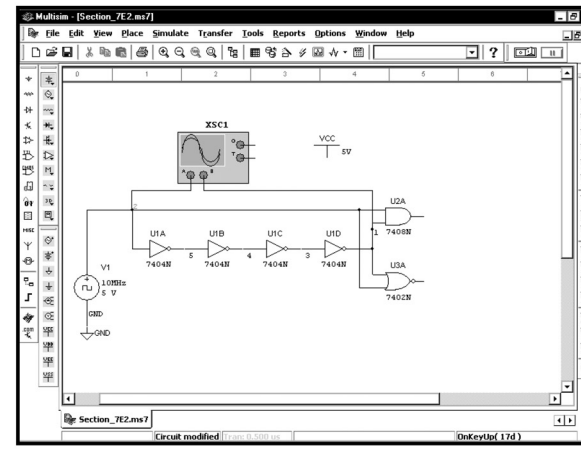
Видно, что узлы питания и заземления обозначены как **VCC** и **GND**. Можно изменить названия узлов в этом диалоговом окне. Нажмем кнопку **Cancel**.

До моделирования нам необходимо переключиться в реальный режим. Выберем пункты меню **Simulate** ⇒ **Digital Simulation Settings** (**Моделировать** ⇒ **Настройки цифрового моделирования**), как показано ниже:

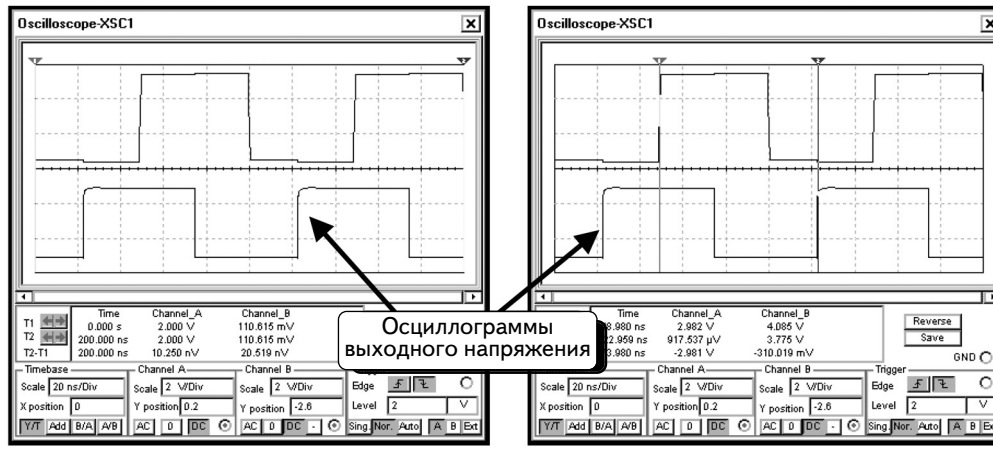


Данное диалоговое окно позволяет выбрать режим моделирования. По умолчанию используется идеальный режим. Выберем опцию **Real** (**Реальный режим**) и нажмем кнопку **OK**:



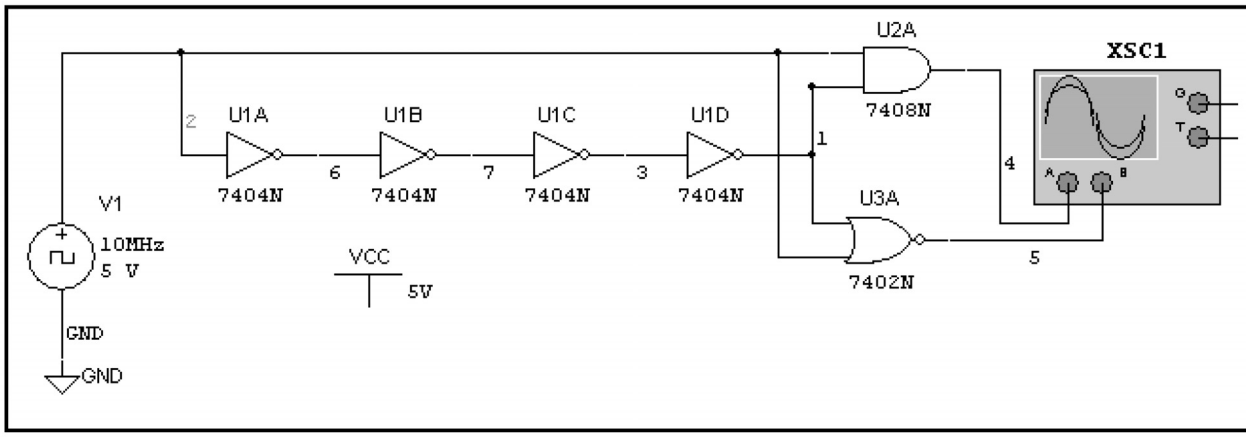


Все готово к моделированию. Сначала рассмотрим задержку на четырех инверторах:



Выходной сигнал логической схемы имеет небольшие время нарастания и импульс перенапряжения (overshoot) на фронте, а углы осциллограммы стали сглаженными. Общая задержка на четырех инверторах составляет около 74 нс, то есть почти равна задержке в идеальном режиме моделирования. Время спада выходного сигнала инвертора очень короткое, причем не наблюдается задержек, возникающих из-за внутренних емкостей схемы и отрицательных выбросов напряжения.

Рассмотрим теперь выходной сигнал схемы:



Осциллограммы показаны ниже:

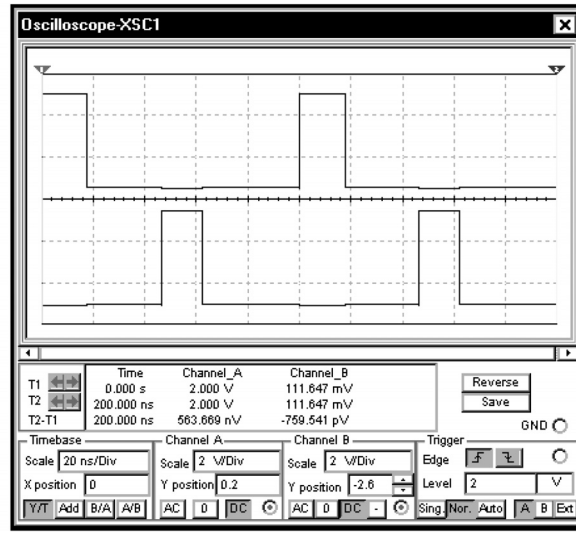


Схема успешно создает сигнал двухфазного таймера, причем выходная осциллограмма очень схожа с осциллограммой в идеальном режиме. В более сложных схемах за счет дополнительных задержек, создаваемых большим числом логических элементов, отличия моделирования в реальном режиме будут более значительными.

7.6. Задачи

Задача 7.1. Сформируйте сигнал с частотой 1 кГц и коэффициентом заполнения 50 % с помощью таймера 555 и JK-триггера.

Задача 7.2. Сформируйте сигнал с частотой 10 кГц и коэффициентом заполнения 50 % с помощью таймера 555 и JK-триггера.

Задача 7.3. Используя счетчик 74xx160, создайте схему, выполняющую счет от 0 до 5. Отобразите значения в окне данных и проверьте работу схемы. Для обнуления начального состояния счетчика примените схему, описанную в разделе 7.4.

Задача 7.4. Используя счетчик 74xx160, создайте схему, выполняющую счет от 3 до 9. Примените четыре логических пробника, чтобы отобразить значения и проверить работу схемы.

Задача 7.5. Создайте 10-разрядный счетчик и исследуйте выходной сигнал с помощью столбикового индикатора. Для инициализации счетчика используйте схему, описанную в разделе 7.4.

Задача 7.6. Создайте двоичный счетчик, выполняющий счет от 0 до 255. Подключите 8 выходов счетчика к цифроаналоговому преобразователю ЦАП (DAC) и добавьте дополнительные компоненты, чтобы аналого вый выходной сигнал имел напряжение в диапазоне от 0 до 5 В. Покажите, что, если счетчик будет постоянно выполнять циклы от 0 до 255, аналоговый выходной сигнал будет представлять собой пилообразное напряжение, изменяющееся в диапазоне от 0 до 5 В с частотой, равной частоте таймера, деленной на 256.

Задача 7.7. Создайте двоичный счетчик, выполняющий счет от 0 до 255, а затем — обратно до 0. Подключите 8 выходов счетчика к ЦАП и добавьте дополнительные компоненты, чтобы аналоговый выходной сигнал имел напряжение в диапазоне от 0 до 5 В. Покажите, что, если счетчик будет постоянно выполнять циклы, аналоговый выходной сигнал будет представлять собой напряжение треугольной формы, изменяющееся в диапазоне от 0 до 5 В при частоте, которая равна частоте таймера, деленной на 510.

Предметный указатель

А

Амплитуда....315, 393
– импульса....387, 406
– напряжения....411
– тока....428
Анализ (Analysis)....145
– вариации на постоянном токе (DC Sweep)....176, 186, 198
вложенные циклы....211
– – параметров (Parameter Sweep)....281, 417, 415, 420
на переменном токе....281
описание (поле Description)....283
получение всех кривых на одном графике....284, 418
произведение полосы на модуль (GBW)....281
список типов вариации....283
частотная характеристика....281
– – температуры (Temperature Sweep)....421, 423
типы....424
– во временной области (Transient Analysis)....315
– на переменном токе (AC Analysis)....240
вариации....240
– декадные....277
– октавные....258
графики Боде....257
декады....258
децибелы....259, 277
октавы....259
при одной частоте....234
таблица выходных переменных....242
частота конечная....242
– начальная....242
число точек....242
– – на декаду....258, 277
шкала вертикальная....242, 258, 277
– линейная....259
– логарифмическая....259
– переходного процесса (Transient Analysis)....47, 78, 315, 366
время начала TSTART....366
– максимальное TMAX....366, 393
– окончания TSTOP....366
использование начальных значений IC....473
минимальное число точек....366
установка максимальной величины шага....366
– рабочей точки (DC Operating Point)....145, 162, 166
– результатов....179
– Фурье (Fourier Analysis)....396, 399
вторая гармоника....398
гармоники....398, 399
гармонические искажения....398
основная частота....396
редактирование анализа переходных процессов....396

Б

Блок заголовка....34
вывод на дисплей....34
изменение....36
Боде-плоттер....252, 255
амплитудно-частотная характеристика....252
инструмент....252
кнопка модуля....254
оси x....254
– – диапазон....254
оси y....267
– – диапазон....254

В

Вариация выходного
– напряжения усилителя....392
– параметра....281
– типа....242, 424
– – переменной....424
ВАХ (вольт-амперные характеристики)....200, 204
Ваттметр....140, 287, 288
В/дел (вольт/деление)....316, 321
Вектор....233, 258
Вертикальная шкала....242, 258, 277
Вертикальные оси Боде-плоттера....267
Верхний предел частоты....279
Верхняя граничная частота....268, 279
Виртуальные диоды....150
Виртуальный компонент....151
Вкладка
– выходных переменных (Output variables)....48
– компонентов (Component bins)....6
– кривых (Traces)....91
– левых осей (Left Axis)....96
– нижних осей (Bottom Axis)....97, 222
– общая (General)....89, 96, 105
– правых осей (Right Axis)....101
– прочих параметров (Miscellaneous Options)....154
– свойства схемы (Preferences Circuit)....145
– ярлыка (Label)....14, 17, 21
значение (Value)....158
Включение питания....474
Возможности VHDL....439
Восстановление графика....112
Время задержки....387, 406, 411, 415
– нарастания....387, 415
– моделирования....366
– спада....387, 415
– усреднения....69
масштаб....316, 319, 359
Входы осциллографа....317, 323
– управления зависимых источников....345
Вывод на дисплей всех параметров компонента....163
– – заголовка....34
– – заземления (G)....318
– – значений опций....273
– – ошибок моделирования Log/Audit Trail....164
– – разметки узлов....32, 145
– – стандартных обозначений компонентов (ID)....273
– – тока при моделировании....180, 183, 339, 430
Выпрямитель однополупериодный....362, 375

Г

Генератор слов (Word Generator) 440
кнопка работы по программе 444
непрерывный режим 449
программирование 444
режим нарастающего счетчика 444
циклический режим 449
Гибридная П-образная модель 165
Границы 102
автоматическая установка 102

Д

Датчик тока 340
– – резистивный 340
Действующее значение 12
– – напряжения 12
Декадная вариация 277
Деления шкалы 102
Делитель частоты на два 464
Дешифратор 471
Диаграмма напряжения 392
Диод 150
– виртуальный 150
– вольтамперные характеристики 197, 199
– встроенный 353
– Зенера (стабилитрон) 379
1N4001GP 197
1N4734 379
панель компонентов 197
параметры 152
коэффициент эмиссии η 150
напряжение обратного пробоя 429
ток 150
– насыщения Is 150, 151
семейства 197
Диодный мост MDA2501 ....355, 356
– – MDA2502 353
Дисплей 7-сегментный 443
Добавление (place) компонента 9, 20
– Led1_Red 39
– Resistor 1_1.0k 38
– из меню 22, 23
– кривых 52
одного 5

Е

Единицы измерения
ГОм 130
кВ 13
кОм 17
мВ 13
МВ 13
мкА/В^2 207
мкВ 13
МОм 132
нОм 132, 159
пОм 131
Единичный коэффициент мощности 290

З

Заголовок 96
блок 34
вывод на дисплей 34
изменение 36
Загрузка графиков 118
– страниц постпроцессора 76
Задержка на микросхемах 476
Заземление 28
0 или ground 31
– для цифровых схем 28, 31, 470, 477
имя 477, 483
основной символ 28, 31
условные обозначения 28
Закрытие панели инструментов 25
Закрытый вход 323, 360
Запуск осциллографа 326
– автоматический 329
– внешний 318
– внутренний 452
Затухание экспоненциальное 411
Звездочка 152
Зуммер 459, 461

И

Идеальный 131
– компонент 151
– операционный усилитель 404
– режим цифрового моделирования 125, 470, 475
цепи активные 297
– пассивные 294
Изменение имени 14
– модели 152, 208
Измерение напряжения 135
ошибка 131
результаты 380
– сопротивления активного 135, 292, 294
– – полного 292, 298
– – – активной цепи 297
– – – пассивной цепи 294
– тока 135
– фазы 335, 337
Инвертор 207, 420
– на биполярных транзисторах 420
– на КМОП-транзисторе 210
– на NMOS-транзисторах 207
Индикатор 123, 454
кнопка 235
– напряжения 123, 147, 234
VOLTMETER _V 235
внутреннее сопротивление 128, 148, 149

переключение режима (AC-DC) 127
– тока 123, 124, 159, 234
внутреннее сопротивление 126
направление 125
ограничения по высокой частоте 234
панель 123
установки по умолчанию 236
– столбиковый 454, 462
– – LVL_BARGRAPH 462
– – недекодирующий 454, 456
Индуктивные цепи 339
Инструменты 315, 317
панели 237, 288
Интегрирующая схема 407
– – Миллера 407
Информация курсора 106, 334
Искажения гармонические 395
Исправление ошибок подсоединения 32
Источник 7
– 2 (source 2) 225
– Vcc 477
– VCE 212, 225
– напряжения 7
– – кусочно-линейного (PWL) 378
формирование PWL напряжения 380
– – переменного (AC) 8
– – постоянного (DC) 7
– – прямоугольного 385
начальное значение 387, 406
ширина импульса 387, 415
– – треугольного 381, 385, 390
– – управляемый напряжением 147, 345
– – управляемый током 180, 184, 185, 240, 339
– синусоидальный 392, 411
– синхронизации 452
– стабилизированный 356
– тока 7
– – постоянного 352, 356, 375
– – управляемый напряжением 150
– – управляемый током 149

К

Катушки индуктивности 15
ток 340
– максимальный 428
Клавиша ESC 26
– F5 158
– F8 10
– F9 10
Клир-фактор (THD) 398
Кривая
– гистерезиса 413
– напряжения 392
вкладка 91
метка 90
поле 93
толщина 90
цвет 90
Кнопка «Apply» (Применить) 98
– «Cut»(Вырезать) 61, 66
– «Draw»(Рисование) 56, 60
– «More» (Больше) 162, 166, 186
– «Save» (Сохранить) 33
– «Set» (Установить) 135
– диодов 197
– дополнительных параметров прибора/модели 166, 187
– изменения модели компонента 152, 208
– индикаторов 235
– моделирования 49, 129, 130, 131, 136, 141
– нового графика 51, 62, 64, 67
– новой диаграммы 245
– – страницы 51, 66
– основных компонентов (basic) 15
– удаления кривой 85
– – страницы 86
Код шестнадцатеричный 441
Компоненты
– объемные 38
поле 38
– пассивные 15
– с предельными параметрами 427, 430
панель 5
перечень 270
подключение 26
ошибки 28, 31
– подсоединения 32
типы 187
Конденсатор 15
Коэффициент затухания 411
– мощности 288
– усиления 264, 276
– – на постоянном токе HFE 218, 224
– – на средних частотах 279
– – по току 218
– фильтрации 361
– эмиссии 150
Кривая передаточная 204, 384, 385, 389, 390, 391, 413
Крутизна среза 466
Курсоры 103, 278, 350
– осциллографа 330
активация 105
информация 106, 334
команды поиска 107
– – предоставляемые курсором 107
переход к следующему максимуму YMAX 108
– – – YMIN 108
установка значения X (SetX_Value) 108
– – Y (SetY_Value) 108
перемещение 106

Л

Легенда 88, 90
флаг 88
Линеаризованная модель 264
Линейная вариация 418, 242, 258
– модель 276

– нагрузка....287
– цепь....252
– шкала....222, 259
Логический анализатор....440, 451, 470
– пробник....454
пороговое напряжение....456
внешний запуск....452
источник синхронизации....452
частота запуска....451
число импульсов/дел....452
Логический сигнал....442

M

Максимальный шаг моделирования....366, 369, 393
установка....366
Малосигнальная модель....264
Малосигнальный коэффициент усиления....264
установки....136
Масштабирование прямоугольной области....111, 394
увеличить....10
– в Grapher....113
уменьшить....10
– в Grapher....112
Меню
– «View» (Вид)....10, 34
восстановить график....112
вывод ошибок моделирования Log/Audit Trail....164
– начальное Windows....1
автоматическое скрытие....2
Метка контрольная (галочка)....145
Микросхема JK-триггера....464
– GBPC2502....353
– GBPC2502A....353
– GBPC2502A....353
– совместимая с TTL....464
– с четырьмя ОУ....270
Моделирование....146
– логических устройств....469
установки по умолчанию....478
– смешанное аналого-цифровое (постпроцесс)....50, 61, 66
время....366
– шага, автоматическое определение....366
минимальное количество точек....366
остановка....148
точки....383
текстовый файл данных....380
установки....6
– по умолчанию....6
Модель MOSFET....207
– гибридная П-образная....165
параметры....281
Модуль....241, 315, 340
– и фаза....233, 287
Мощность....287
– на переменном токе....287
– рассеиваемая....140
измерение....140, 142
коэффициент....287, 288
–, коррекция....290
–, ограничение....429
Мультиметр....123, 133, 234
кнопка «Set» (Установка)....135
– A....136
– V....136
– вызова прибора....134
измерение сопротивления....292
измерения на переменном токе....237
соглашение о токах....134
установки....136

H

Напряжение
– база-эмиттер....428
– коллектор-база....428
– коллектор-эмиттер....212
– на узле (узловое)....143
– обратного пробоя диода....429
– смещения ОУ....411
– холостого хода....157
Начальные значения....387, 406
– условия....472
– – на конденсаторе....406
– – цепи запуска....472

O

Ограничитель с «мертвой зоной»....385, 391
Одновибратор....468
Операционный усилитель (ОУ)....269, 281, 404, 410
– – LM124J....269, 281
Опережение....337, 342
Осциллограф....316
A и B каналы....318
B/дел....316, 321
вход....317, 323
– закрытый (AC)....137, 323, 360
– открытый (DC)....323
горизонтальные оси....316
запуск....326
– нормальный....327, 329
– внешний....318
– внутренний....452
– автоматический....329
– однократный....329
уровень....327
кнопка Y/T....320
курсоры....330
перемещение....331
масштаб по времени....316, 319, 359
нуль (0)....323
окно....319, 336
получение осциллограмм....318, 454
разность напряжений по каналам A и B....344

режим 323, 358
– заземления 318, 323
шкалы 320, 348
экран электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) 326
эксперименты 318
Ось x (нижняя) 95
вкладка 97, 222
границы в Боде-плоттере 254
метка 95, 97
шкала 112
– линейная 222
– логарифмическая 222
Ось y 95
вкладка 96
– правая 100
границы в Боде-плоттере 254
смещение 322
установки 96
шкалы 112
Отклик 52
Отношение ширины к длине пластины 210
Отражение по горизонтали 442
Отрицательная обратная связь 269
Отставание 337, 342
Ошибка измерения 131
– подсоединения 25

П

Панель индикаторов 123
– инструментов 237, 288
– компонентов 5
– – с предельными параметрами 427
– транзисторов 161
Параметр 187, 283
– компонента 281
– модели 167
– модели компонента 167
– прибора/модели дополнительный (кнопка) 166, 187
имя @qql[ic] ....212 (на рис.)
@rrl[i] 195
Перекрестье 26, 27, 30
Переменный ток (AC)
источник напряжения 8
кнопка прибора 137
мощность 287
режим 236
Пересечение нуля 349, 463
Переходные характеристики на постоянном токе 204
Перечень компонентов 270
Период 387
Петля обратной связи 281
Поворот компонента 22, 442
– – по часовой стрелке на 90° 22
отражение по горизонтали 442
Повторитель 298
Подведение курсора мыши 8
Подсоединение компонентов 26, 28, 31
точка соединения 28
Подсхемы 171
Полоса пропускания 281
Постпроцессор 1, 47
добавление кривых 52
загрузка страниц постпроцессора 76
кнопка «Calculate» (Вычислить) 56
новая диаграмма 245
кнопка 245
новая страница 51
кнопка 62, 66
новый график 51
кнопка 62, 64, 67
удаление графика 83
– диаграмм 85
кнопка 85
– кривой 82
кнопка 82
– страницы 86
кнопка 86
Правая кнопка мыши 21, 22
Пробник логический 454
Провод 27
соединение 28
исправление 32
Проводимость 290
Программа Grapher 47, 56, 57, 87
вкладка общая 89, 96, 105
восстановить график 112
границы по осям 102
автоматическая установка 102
деления шкалы 102
заголовок 96
кнопка рисования 60
– «применить» 98
кривая
вкладка 91
легенда 88, 90
поле 9
толщина 90, 91, 94, 99
цвет 90
ярлык 90
курсор 103
– активизирован 105
информация 106
перемещение 106
треугольник 104
масштабирование 110
– прямоугольной области 111
увеличить 113
уменьшить 112
новая страница 51
оси левые 95
вкладка 96
ось x, ярлык 95, 97
шкала 112
ось y вторая 98
– –, ярлык 95, 97
две 98
установка 96
шкала 112

ось нижняя 95
ось правая 100
вкладка 101
построение графика в процессе моделирования ....
48, 146, 163
нескольких кривых на одном графике....284, 418
разметка осей 95
– узлов 32
свойства графиков 105
сетка 90
поле текста 92
открытие 80
сохранение и загрузка графиков 118
– файлов 118
страница 50
удаление всех страниц 81
– страницы 61
кнопка 61, 66
числовые значения 103
ярлыки 94, 99
поле текста для меток 92
Программа Excel 381
– Multisim 2001 3
– Multisim 7 V
Прямоугольные координаты 287
Пульсации выходного сигнала 358, 371, 427, 426
– – – 60 Гц 358

P

Развертывание графика на весь экран 56
Расширение gra 119
Режим постоянного или переменного сигнала ...125, 127
– постоянного тока 236
– цифрового моделирования 439, 469
– – идеальных ИС 470
– – реальных ИС 477
Резистор 15
– 5%-ный 19
– 3D (объемный) 38
датчик тока 340
имя 17
свойства 16
цветовой код 39
– с ограничением по мощности 429

C

Светодиоды 200
вольтамперные характеристики 200, 204
Свойства компонента 10, 12
Сетка 90
Сигнал затухающий синусоидальный 411
– логический 442
– цифровых устройств 477
переменная составляющая 358
Спад крутой 466
– плавный 411
Список стандартных значений температуры 424
– типов вариации Sweep Variation Type 283
Среднее значение 69
Стабилизатор непрерывный 355, 358, 365, 421
Стандартное обозначение компонента (ID) 274
Создание схемы 1
Сохранение графика 118
– страницы постпроцессора 76
– схемы 33
Сохранить как установку по умолчанию 6
Сочетание клавиш CTRL-ESC 2
CTRL-G 80, 119
CTRL-R 22
CTRL-S 33
CTRL-W 23
SHIFT-CTRL-R 22
Стабилизатор 356, 375
– непрерывный 7815 361
напряжение опорное 422
Стабилитрон
номинальное напряжение 22
ограничители 204, 385, 464, 465
Схема замещения Нортона 156
– – Тевенина 156
– – – Rth 157
– – – Vth 157
Схема И 459
– – 74LC21N 460
– интегрирующая 407
– ограничителя 385, 391
– с RLC-цепями 344, 352
Счетчик 464, 468
– 74160 468
– десятичный 468, 471
– Джонсона 469
– кольцевой 474
– шестнадцатеричный 443

T

Таблица audit trail 162
Таймер двухфазный 475
импульсы 476
микросхема 555 471
Температура 150, 154
27°C 155
зависимость 426
непрерывный стабилизатор 421
тепловой потенциал 150
Ток 340
– базы 165
– в ветви 180
– катушки индуктивности 340
– коллектора 165, 168, 212, 428
– – предельный 427
– короткого замыкания 159
– насыщения 150
– стока 171
– через резистор 186

– эмиттера 218
Транзистор биполярный 161
2N3904 ....162, 213
NPN 162, 265
PNP 224
коэффициент усиления по постоянному току 218
напряжение коллектор-эмиттер VCE 225
панель 161
проходной NPN 422
рабочая точка 161
характеристики 211
– полевой 297
характеристики 213, 217
– – MOS_3TDN_VIRTUAL 207
– – MOS_3TENJ/VIRTUAL 207
– – MOSFET с встроенным каналом 207
– – MOSFET с индуцированным каналом 207
Kp 207
lambda 207
– – – нагрузочный 207
VTO 207
W/L 210
модель 207, 210
пороговое напряжение 207
– – PMOS с индуцированным каналом 210
Трансформатор 354
– TS_PQ4_24 354
Триггер 466
– JK 464
выход Q 466
– Шмитта 410, 414, 464, 465
начальный сброс 472

У

Удаление
– графика 83
– диаграммы 85
– кривой 82
– страницы 61
Узел
0 31
название на дисплее 32
напряжение на постоянном токе 143
номера 143
переименование 32
разметка 32
Узловой анализ 123
Усилитель без искажений 396
– с общей базой (ОБ) 268
диаграммы выходного напряжения 392

Ф

Фазовый угол 233, 340, 411
графики 252
измерение 335, 337
нагрузки 288
частотная зависимость 252
Файл данных 380
– предыдущий 77
сохранить 33
Фильтр невыделенных переменных 171
Фирма General Semiconductor 353
– International Rectifier 353

Ц

Цепи RLC 344, 352
– – параллельные 352
– – последовательные 344
– емкостные 335
– запуска 472
– индуктивные 339
– синхронизации 468

Ч

Частота гармоники 398
– конечная 242
– начальная 242
– основная 396, 398
– резонансная 344
– синхронизации 451
– снижения на 3 дБ 268, 279
– – – верхняя 279, 286
Числовые значения курсоров 103

Ш

Шестнадцатеричный код 441
– счетчик 443

Э

Экран ЭЛТ 326
Экспоненциальное затухание 411

Я

Ярлык 94, 99
вкладка 14, 17, 21
поле текста 92