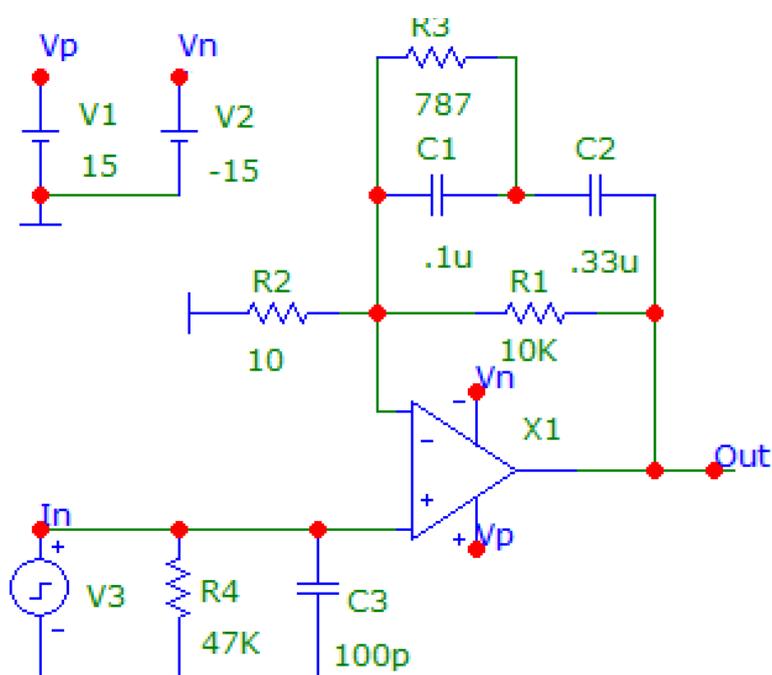




Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры

# Информационные технологии проектирования РЭС. Лабораторный практикум.



Томск 2018

**Кобрин Юрий Павлович**

**Информационные технологии проектирования РЭС. Лабораторный практикум.** Методические указания по проведению практических и лабораторных занятий по дисциплине «Информационные технологии проектирования электронных средств» для студентов специальности «11.03.03 «Конструирование и технология радиоэлектронной аппаратуры». - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), кафедра КИПР, 2018. – 53 с.

Цикл практических работ ориентирован на освоение базовых приёмов аналогового и цифрового схемотехнического моделирования на основе САПР Micro-Cap v12 (студенческая версия). Приводятся краткие теоретические сведения, необходимые для подготовки к выполнению работ. Определены общие требования к оформлению и содержанию отчётов.

Методические указания предназначены для помощи в подготовке бакалавров и магистрантов в области разработки и моделирования РЭС различного назначения, выполнения курсовых и дипломных проектов и может быть использованы студентами других специальностей радиотехнического профиля.

©Кафедра КИПР федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)», 2018.

© Кобрин Ю.П. 2018

## Содержание

<b>Введение</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Знакомство с программой схемотехнического моделирования Micro-Cap v12 Evaluation</b> .....	<b>5</b>
1.1 Цели занятия:.....	5
1.2 Порядок выполнения работы .....	5
1.2.1 Знакомство с основными возможностями программы Micro-Cap .....	5
1.2.2 Частотный анализ резистивно-ёмкостной схемы .....	6
1.2.3 Исследование схемы транзисторного усилителя .....	6
1.3 Контрольные вопросы .....	7
<b>2 Исследование источников напряжения</b> .....	<b>8</b>
2.1 Цели и задачи занятия: .....	8
2.2 Практические задания .....	8
2.2.1 Исследование независимого источника постоянного напряжения .....	8
2.2.2 Исследование линейного зависимого источника напряжения .....	13
2.2.3 Исследование делителя напряжения .....	14
2.3 Контрольные вопросы .....	15
<b>3 Исследование источников тока</b> .....	<b>16</b>
3.1 Цели и задачи занятия: .....	16
3.2 Практические задания .....	16
3.2.1 Исследование независимого источника тока .....	16
3.3 Контрольные вопросы .....	23
<b>4 Исследование модели резистора в Micro-Cap</b> .....	<b>23</b>
4.1 Цели и задачи занятия: .....	23
4.2 Практические задания .....	24
4.2.1 Исследование идеального линейного резистора .....	24
4.2.2 Исследование реального линейного резистора .....	25
4.2.3 Исследование моделей идеальных нелинейных резисторов .....	26
4.3 Контрольные вопросы .....	27
<b>5 Исследование модели конденсатора в Micro-Cap</b> .....	<b>27</b>
5.1 Цели и задачи занятия: .....	27
5.2 Практические задания .....	28
5.2.1 Исследование модели идеального конденсатора (без паразитных параметров).....	28
5.2.2 Исследование модели конденсатора с паразитными параметрами .....	29
5.3 Контрольные вопросы .....	30
<b>6 Исследование модели индуктивности в Micro-Cap</b> .....	<b>30</b>
6.1 Цели и задачи занятия: .....	30
6.2 Практические задания .....	31
6.2.1 Исследование модели идеальной катушки индуктивности (без паразитных параметров).....	31
6.2.2 Исследование модели конденсатора с паразитными параметрами .....	33

<b>7</b>	<b>Спектральный анализ сигналов периодических и непериодических сигналов</b>	<b>34</b>
7.1	Цели и задачи занятия:	34
7.2	Практические задания	34
7.2.1	Исследование непериодических сигналов	34
7.2.2	Исследование периодических сигналов	36
7.3	Контрольные вопросы	39
<b>8</b>	<b>Параметры спектрального анализа в программе Micro-Cap</b>	<b>39</b>
8.1	Цели и задачи занятия:	39
8.2	Практические задания	40
8.2.1	Построение спектральной диаграммы импульса с большой скважностью (видеоимпульса)	40
8.2.2	Построение спектральной диаграммы модулированного импульса с большой скважностью (радиоимпульса)	41
8.3	Контрольные вопросы	43
<b>9</b>	<b>Исследование вольтамперной характеристики диода</b>	<b>43</b>
9.1	Цели и задачи занятия:	43
9.2	Модель полупроводникового диода в Micro-Cap	44
9.3	Практические задания	48
9.3.1	Исследование вольтамперных характеристик диода в зависимости от напряжения	48
9.3.2	Исследование вольтамперных характеристик диода в зависимости от температуры	50
<b>10</b>	<b>Список рекомендуемой литературы</b>	<b>51</b>

## Введение

Целями лабораторного практикума по дисциплине «Информационные технологии проектирования РЭС» являются:

- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных занятиях;
- получение и закрепления навыков по проведению математического моделирования с использованием САПР;
- формирование умений интерпретировать результаты компьютерного моделирования и принимать решения по оптимизации параметров и характеристик РЭС;
- закрепление практических навыков работы на компьютере.

Каждое занятие включает следующие этапы: выдача задания, подготовка, допуск, выполнение, обработка, оформление, сдача и защита.

Теоретическая подготовка к занятию производится во внеаудиторное время. При проработке теоретических вопросов следует также использовать конспекты лекций и дополнительную литературу [1,2,3,4].

Допуск к выполнению работы, в ходе которого проверяется готовность студентов к выполнению работы, уровень теоретической подготовки, знание терминов, понимание сущности предстоящей работы.

После выполнения студентом задания и оформления отчёта, преподаватель проверяет полученные студентом результаты и допускает его к защите, которая проводится либо в форме тестирования, либо устного опроса по контрольным вопросам.

Работа не принимается к защите если:

- выполненная работа не соответствует варианту;
- при проверке был зафиксирован факт плагиата (отчёт списан);
- неправильно оформлен титульный лист;
- отсутствуют пояснения и интерпретация полученных результатов, отсутствуют выводы, подробные расчёты, исходные формулы и т.п.;
- при оформлении отчёта допущены многочисленные, грубые нарушения стандарта университета [5].

Зачёт по работе ставится по выполнению всех предусмотренных этапов. Работа не засчитывается, если студент не может показать выполнение на компьютере любой из использованных при выполнении работы процедур.

В соответствии с рабочей программой дисциплины выставляется также рейтинговая оценка.

Отчёт может быть представлен в электронном виде и должен содержать:

- титульный лист, оформленный в соответствии со стандартом университета [5].
- цели занятия;
- схемы и параметры моделируемых устройств (на схемах обязателен текст: № группы, ФИО студента, № варианта), исходные соотношения и расчёты;
- результаты, полученные при работе на компьютере, оформленные в виде таблиц и графиков (снимков с экрана) с необходимыми пояснениями;
- обсуждение полученных результатов, выводы по работе.

# 1 Знакомство с программой схемотехнического моделирования Micro-Cap v12 Evaluation

## 1.1 Цели занятия:

- Знакомство с интерфейсом программы схемотехнического проектирования и моделирования Micro-Cap v12 Evaluation [1].
- Приобретение навыков графического ввода и редактирования электрических принципиальных схем в формате схем Micro-CAP.
- Знакомство с программой и практическое освоение на примерах основных приёмов моделирования [1].

## 1.2 Порядок выполнения работы

### 1.2.1 Знакомство с основными возможностями программы Micro-Cap

1. Ознакомиться с основными возможностями программы Micro-Cap при помощи, порядком анализа электронных устройств при помощи Micro-Cap и порядком создания схем для моделирования [1,2,3,4].

2. Запустить программу Micro-Cap.

3. Изучить структуру главного окна программы Micro-CAP.

4. Освоить структуру основных разделов меню команд Micro-CAP, пиктограммы строки инструментов и функциональные клавиши.

5. Используя команду *Text mode* создать заголовок данной работы, поместив его в верхней части окна.

6. Используя пиктограммы строки инструментов, меню *Component* или панель компонентов (включить последнюю можно в меню *Options*  $\Rightarrow$  *Panel*) поочерёдно выведите в рабочее окно различные компоненты электрических схем (земля, резистор, конденсатор и др.). Внимательно изучите особенности ввода параметров каждого компонента.

7. Создайте замкнутую электрическую цепь, состоящую из источника постоянного напряжения и десяти резисторов, соединённых между собой произвольным образом (последовательные и параллельные соединения), заземлив минус источника питания. Рассчитайте токи, напряжения и мощности сопротивлений по постоянному току.

8. Создайте замкнутую электрическую цепь, состоящую из источника синусоидального напряжения (выбрав и отредактировав соответствующую модель) и десяти конденсаторов, соединённых между собой произвольным образом (последовательные и параллельные соединения), заземлив минус источника питания. Рассчитайте токи и напряжения компонентов по переменному току.

9. Создайте схему, состоящую из источника *Pulse* (выбрав и отредактировав соответствующую модель), нагруженного на сопротивление. Установите параметры источника *Pulse*, при которых сигнал принимает форму меандра, трапеции, треугольника и пилы. Выведите их на графики.

### 1.2.2 Частотный анализ резистивно-ёмкостной схемы

1. Нарисовать резистивно-ёмкостную схему (Рис. 1.1). Задать следующие сопротивления резисторов и ёмкости конденсаторов:

$R1=100 \text{ Ом}$ ,  $R2=2.2 \text{ кОм}$ ,  $R3=15 \text{ МОм}$ ,  $R4=0.91 \text{ МОм}$ ,  $R5=15 \text{ Ом}$ ,  $R6=1.6 \text{ кОм}$ ;  
 $C1=100 \text{ мкФ}$ ,  $C2=12 \text{ пФ}$ ,  $C3=4.7 \text{ нФ}$ ,  $C4=10 \text{ мФ}$ ,  $C5= 2 \text{ мкФ}$ ,  $C6= 120 \text{ нФ}$ .

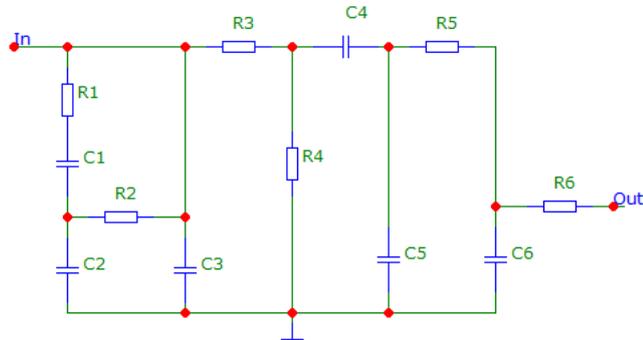


Рис. 1.1 - Резистивно-ёмкостная схема

2. Построить амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики.

### 1.2.3 Исследование схемы транзисторного усилителя

1. Нарисовать схему каскада транзисторного усилителя с общим эмиттером (Рис. 1.2).

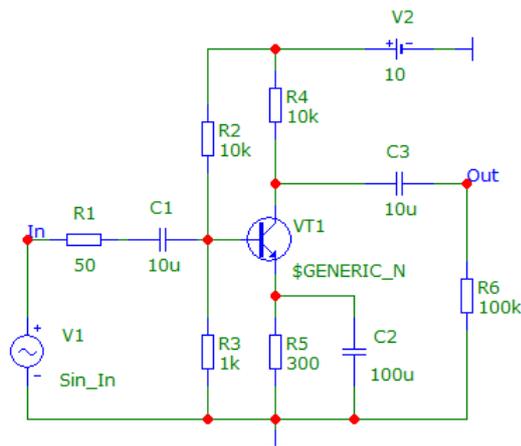


Рис. 1.2 - Схема каскада усилителя с общим эмиттером

2. Источнику V1 присвоить имя SIN\_IN, амплитуду синусоидального сигнала 10 мВ и частоту 10 кГц.

3. Выполнить анализ переходных процессов в меню *Analysis*  $\Rightarrow$  *Transient*.

В окне задания параметров моделирования задайте время моделирования 300 мкс (время 300u - три периода сигнала входного сигнала). Максимальный шаг анализа - 0.1u). Установить флаг *Operating Point*, чтобы перед расчётом переходных процессов был проведён расчёт режима работы каскада по постоянному току. Тогда напряжения на конденсаторах примут установившиеся значения.

4. Определить потенциалы узлов и мощности, выделяемые на компонентах схемы в режиме по постоянному току.

5. Задать параметры выводов графиков: номер графика, выражения, которые будут выводиться по осям  $X$  и  $Y$  и масштаб. Вывести на график напряжения и токи в точке  $In$  и в точке  $Out$ .

6. Настроить режим работы усилительного каскада, используя режим *Dynamic DC*. Для этого увеличивать сопротивление резистора  $R2$  до тех пор, пока потенциал точки  $A$  не станет равным половине напряжения питания (половине напряжения источника  $V2$ ).

### 1.3 Контрольные вопросы

- 1) Какими тремя способами можно ввести в рабочее окно схем простые компоненты?
- 2) Как задать атрибуты компонентов схемы?
- 3) Что такое паразитные параметры и как их ввести в модель простого компонента?
- 4) Какие действия выполняются с помощью команд *Grid Text*, *Attribute Text*, *Node numbers*, *Pin Connections*, *Rubberbanding*?
- 5) Как определить координаты произвольной точки графика?
- 6) Как измерить расстояние по горизонтали (по вертикали) между двумя выбранными точками графика?
- 7) Какая информация выводится в окне графиков в режиме электронного курсора (*Cursor*)?
- 8) Как переместить курсор к следующему пику (впадине) графика, расположенному слева или справа от текущего положения электронного курсора?
- 9) Как переместить курсор к наиболее высокой (низкой) точке графика?
- 10) Как переместить курсор к ближайшей точке перегиба, расположенной слева или справа от текущего положения курсора?
- 11) Как нанести на график координаты левого(правого) курсора?
- 12) Как нанести на график размерные линии между точками графика, отмеченными левым и правым курсорами, и указания расстояния между ними по горизонтали (по вертикали)?
- 13) Как задать параметры источника *Sine Source*?
- 14) Как задать параметры генератора *Pulse Source*?
- 15) Где отображаются токи и напряжения при выполнении анализа *Dynamic DC*?
- 16) Относительно чего указываются потенциалы (напряжения) при выполнении анализа *Dynamic DC*?
- 17) Чему равен потенциал «земли» при выполнении анализа *Dynamic DC*?
- 18) Что нужно ввести в поле *Value* для того, чтобы задать сопротивление резистора 10 Ом?
- 19) Что нужно ввести в поле *Value* для того, чтобы задать сопротивление резистора 10 МОм?
- 20) Чему равно сопротивление резистора, заданного как 2.2E3?
- 21) Чему равна ёмкость конденсатора, заданного как 2U?

- 22) Как узнать, соединены ли проводники в точке пересечения?
- 23) Что означает поле *Time Range* при выполнении анализа *Transient*?
- 24) Как задать время расчёта 35 мкс при выполнении анализа *Transient*?
- 25) Что нужно задать в поле *Y Expression*, для того чтобы вывести напряжение в узле 1?
- 26) Что нужно задать в поле *Y Expression*, для того чтобы вывести напряжение в узле с именем А?
- 27) Что нужно задать в поле *Y Expression*, для того чтобы вывести напряжение между узлами 3 и 4?
- 28) Что нужно задать в поле *Y Expression*, для того чтобы вывести ток через резистор R3?
- 29) Какая команда запускает выполнение анализа?

## 2 Исследование источников напряжения

### 2.1 Цели и задачи занятия:

- ознакомление с различными видами источников напряжения в программе Micro-CAP
- исследование параметров и характеристик независимых источников напряжения;
- исследование параметров и характеристик линейных зависимых источников напряжения.

### 2.2 Практические задания

#### 2.2.1 Исследование независимого источника постоянного напряжения

1. Собрать типовую схему использования источника постоянного напряжения (Рис. 2.1).

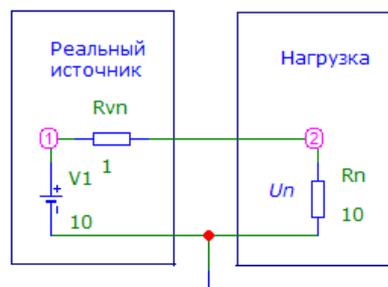


Рис. 2.1 - Схема с источником постоянного напряжения и резистивной нагрузкой:  $V1$  – источник постоянного напряжения (*Battery*),  $R_{vn}$  – внутреннее сопротивление источника напряжения,  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $U_n$  – напряжение на нагрузке.  $V1 = 10$  В,  $R_{vn} = 1$  Ом,  $R_n = 10$  Ом

2. Выполнить расчёт режима по постоянному току для этой схемы используя меню *Dynamic DC*. Включите кнопки **Вывод номеров узлов (Node Numbers)**, **Вывод напряжений в узлах (Node Voltages)**, **Вывод токов (Currents)** и нажмите Ok в появившемся диалоговом окне *Dynamic DC Limits* (Рис. 2.12).

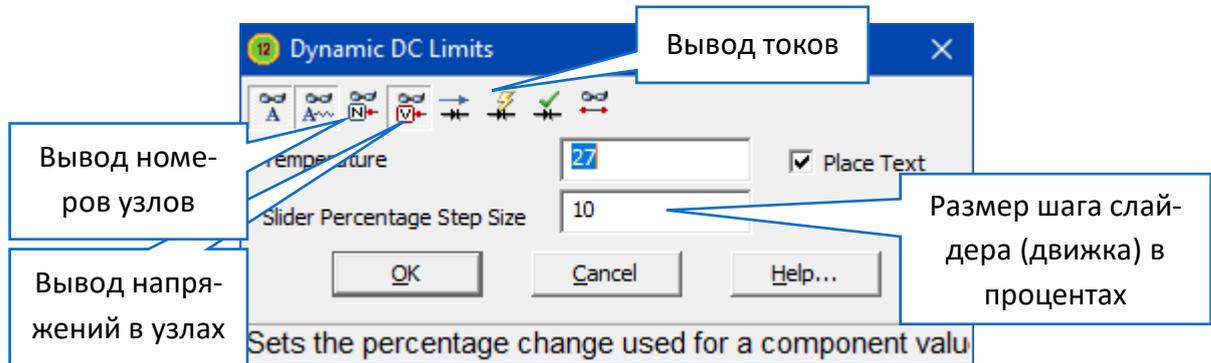


Рис. 2.2 – Окно установки параметров режима *Dynamic DC Limits*

Измерить в режиме *Dynamic DC* напряжение  $U_n$  и ток  $I_n$  через  $R_n$ . Меняя сопротивление резистора  $R_n$  от 10 Ом до 0 Ом построить таблицу значений  $R_n, U_n, I(R_n)$  (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Исследование влияния изменения нагрузки на напряжение реального источника постоянного напряжения

$R_n, \text{ Ом}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I(R_n), \text{ А}$											
$U_n, \text{ В}$											

Для изменения параметров сопротивления  $R_n$  следует добавить слайдер (движок), вызвав диалоговое окно Рис. 2.3 с параметрами слайдера с помощью команд меню *Dynamic DC*  $\Rightarrow$  *Slider*  $\Rightarrow$  *Add Slider*. В открывшемся окне выбирают компонент, для которого нужно добавить слайдер (в нашем случае  $R_n$ ), уточняют минимальное и максимальное значение изменяемого параметра и шаг его изменения (в процентах). После выхода из окна выделяют на схеме изменяемый компонент, а затем стрелками управления курсором  $\uparrow \downarrow$  на дополнительной клавиатуре меняют его параметры. Каждое нажатие на стрелку изменяет значение на 10%, но можно установить и другой шаг,

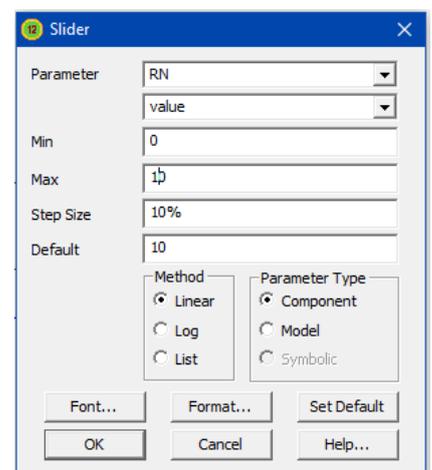


Рис. 2.3 - Окно изменения параметров слайдера

3. Объяснить, почему напряжение на выходе источника напряжения, обладающего внутренним сопротивлением, уменьшается при уменьшении сопротивления нагрузки.

4. По результатам измерений пункта 2 построить внешнюю характеристику источника напряжения (график зависимости напряжения на выходе источника от тока нагрузки). Построить график по полученным данным с использованием программы *MS Excel*.

5. По графику внешней характеристики рассчитать внутреннее сопротивление источника  $R_{vn}$  (полагая, что оно не известно). Это сопротивление (*дифференциальное сопротивление*) равно отношению приращения напряжения к вызвавшему его приращению тока  $R_{vn} = \Delta U_L / \Delta I_L$ . Сравнить полученное значение со значением  $R_{vn}$  схемы Рис. 2.1.

6. В схеме Рис. 2.1 задать для резистора  $R_n$  зависимость сопротивления от времени выражением  $1 + 10 * t$ . Пример задания функциональной зависимости сопротивления резистора представлен на Рис. 2.4.

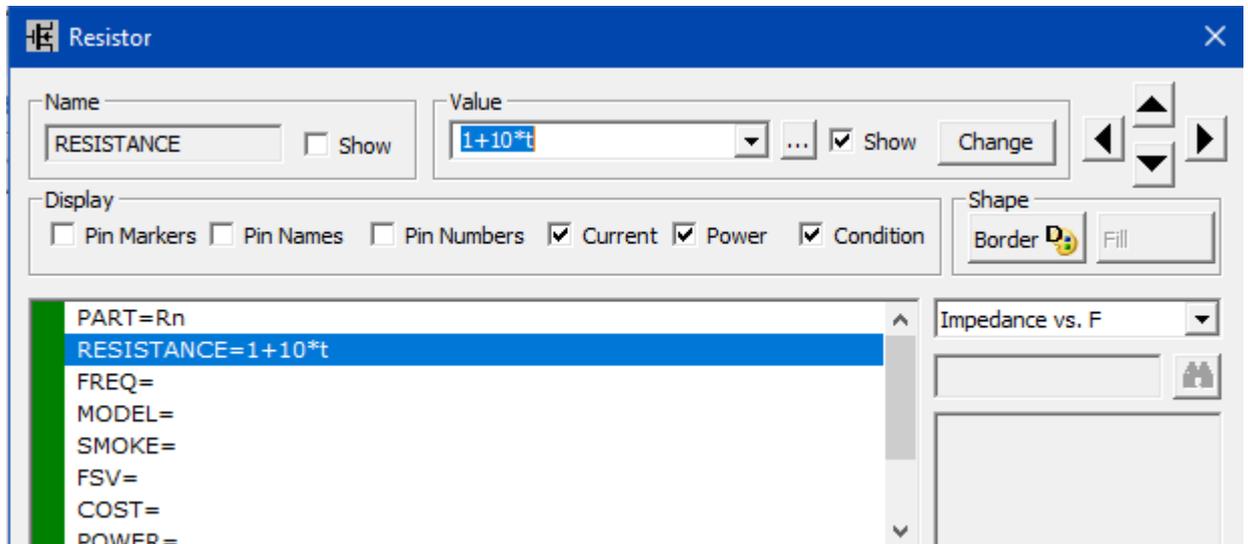


Рис. 2.4 - Пример задания функциональной зависимости сопротивления резистора

7. Построить график зависимости напряжения на нагрузке от тока нагрузки (внешнюю характеристику). Построение графика внешней характеристики проводится в режиме анализа *Transient*. Время расчёта 1 с. Максимальный шаг анализа – 1 мс. Масштаб по оси X: 0..6 A, шаг сетки 0.5 A, масштаб по оси Y: 0..10 V, шаг сетки 1 V.

Для построения графика зависимости напряжения от тока необходимо в графе *X Expression* указать ток через резистор  $R_n$ , т.е. ввести выражение  $I(R_n)$  (по умолчанию в этой графе стоит время  $T$ ), а в графе *Y Expression* указать напряжение на резисторе  $R_n$ , т.е. ввести выражение  $V(R_n)$  (Рис. 2.5). Формат задания масштаба (*X range* и *Y range*):  $max, min$ , шаг сетки).

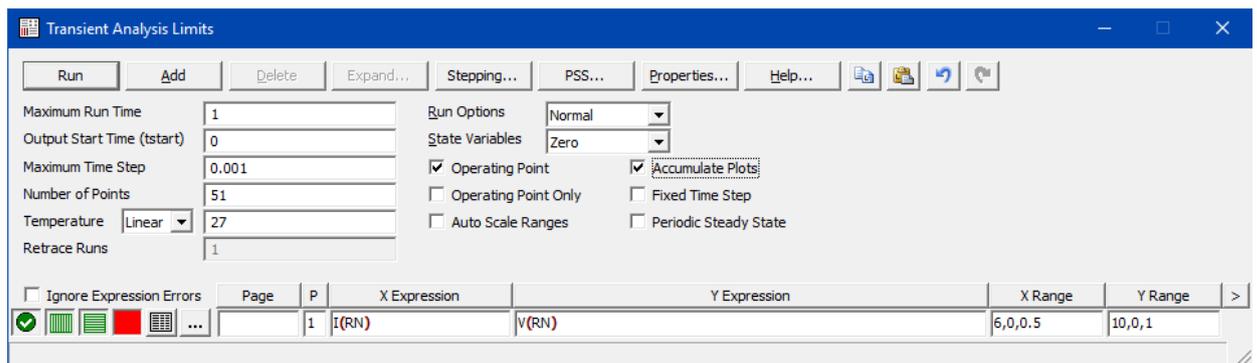


Рис. 2.5 - Параметры анализа *Transient* для построения внешней характеристики  
Сравнить построенный график с графиком, построенным в пункте 4.

**Внимание!** Если значения отрицательные (график – возрастающий), то необходимо перевернуть резистор, ток через который выводится на график. Это связано с тем, что в Micro-Cap за положительное направление тока в резисторе принято направление от условно плюсового вывода к условно минусовому. Однако «полярность» резистора по умолчанию не показывается. Поэтому на графике ток через резистор может принимать как положительное, так и отрицательное значение, и для получения положительного значения может потребоваться коррекция его ориентации относительно схемы. Чтобы токи и напряжения имели положительные значения.

8. Задать изменение резистора  $R_{vn}$  от 1 до 5 Ом с шагом 1 Ом. Построить семейство внешних характеристик используя режим *Transient* (аналогично пункту 7).

Для получения семейства графиков зависимостей напряжения на выходе источника от тока нагрузки (семейство внешних характеристик) при разных значениях  $R_{vn}$  нужно выполнить многовариантный анализ *Stepping*, окно задания параметров которого вызывается одноименной кнопкой в параметрах анализа переходных процессов *Transient* (Рис. 2.6).

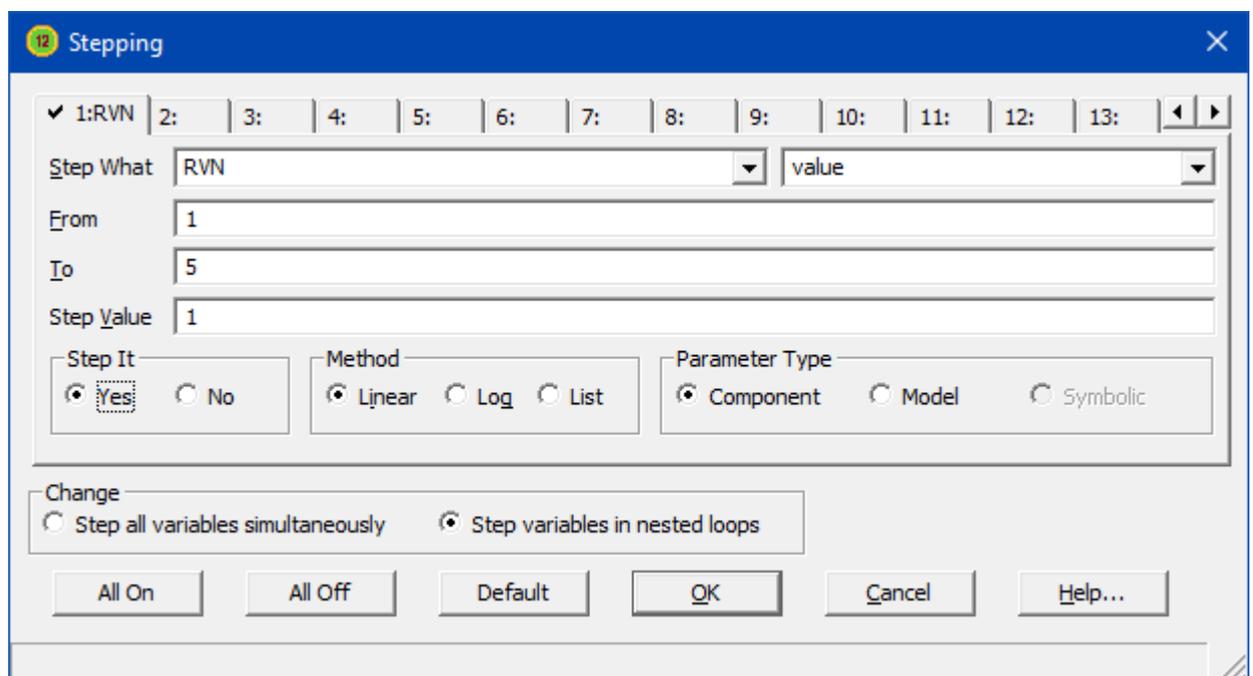


Рис. 2.6 - Задание параметров *Stepping* режима анализа *Transient*

Выполнив расчёт, мы получим семейство внешних характеристик на одном графике. Чтобы определить, какому именно графику соответствует каждое значение  $R_{vn}$ , необходимо после выполнения анализа *Transient* и получения графика выполнить команду меню *Scope* ⇒ *Label Branches*.

На основании анализа полученного семейства графиков сделать вывод о влиянии внутреннего сопротивления источника напряжения на его внешнюю характеристику.

При каком значении сопротивления  $R_{vn}$  источник напряжения можно считать идеальным?

После построения графика необходимо отключить *Stepping*, поставив флажок *Step It* в положение «No» (см. Рис. 2.6) и убрать с графика метки значений *Rvn*, выполнив команду *Scope > Delete All Objects*.

9. Построить график зависимости мощности, рассеиваемой на нагрузке *Rn* при изменении сопротивления нагрузки от нуля до 10 Ом.

Мощность задавать как произведение тока на напряжение. Сопротивление резистора *Rn* задать формулой  $(1 * t)$ . Время расчёта 10 с. Масштаб по оси *X*: 0..10 Ом, шаг сетки 1 Ом, масштаб по оси *Y*: 0..30 Вт, шаг сетки 5 Вт.

Для получения графика зависимости мощности от сопротивления необходимо в графе *X Expression* указать сопротивление резистора *Rn* (т.е. записать выражение  $R(Rn)$ ), а в графе *Y Expression* записать выражение для вычисления мощности  $I(Rn)*U(Rn)$  (Рис. 2.7). Формат задания масштаба (*X range* и *Y range*): *max,min*, шаг сетки.

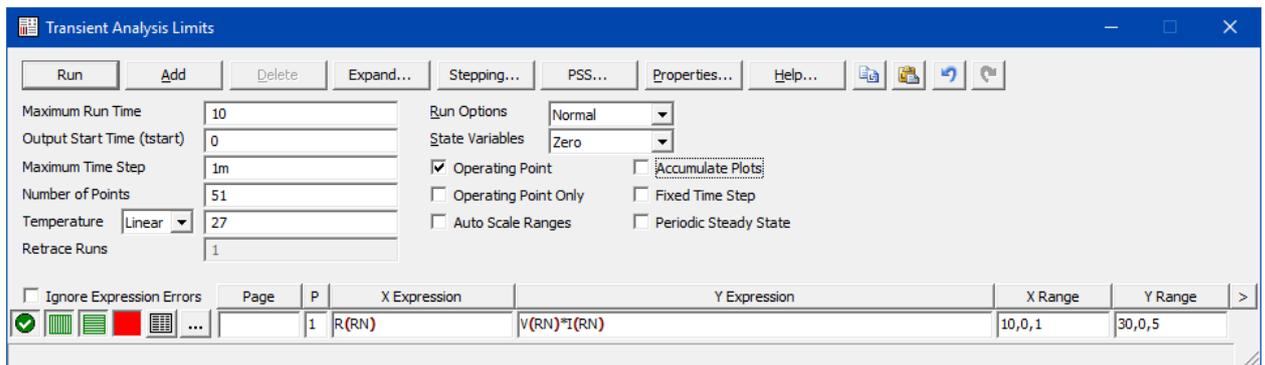


Рис. 2.7 - Параметры для получения графика зависимости мощности от сопротивления

По полученному графику определить, при каком сопротивлении нагрузки в ней рассеивается максимальная мощность.

Увеличить внутреннее сопротивление источника *Rvn* до 5 Ом. Построить график зависимости мощности, рассеиваемой на нагрузке *Rn* при изменении сопротивления нагрузки от нуля до 10 Ом. Масштаб по оси *X*: 0..10 Ом, шаг сетки 1 Ом, масштаб по оси *Y*: 0..6 Вт, шаг сетки 1 Вт.

Определить, при каком сопротивлении нагрузки в ней рассеивается максимальная мощность.

На основании результатов п. 9 и 0 сделать вывод о том, при каком условии в нагрузке рассеивается максимальная мощность.

10. Задать сопротивление  $Rvn = 0$  и  $Rn = 0$ , а напряжение источника  $V1 = 10$  мВ. В режиме *Dynamic DC* измерить ток, протекающий в цепи и напряжение *Rn*. По результатам измерений вычислить значение внутреннего сопротивления источника *V1*.

## 2.2.2 Исследование линейного зависимого источника напряжения

1. Собрать схему исследования источника напряжения, управляемого напряжением (Рис. 2.8). Она состоит из формирующего управляющее воздействие источника  $V1$  и зависимого источника  $E1$ .

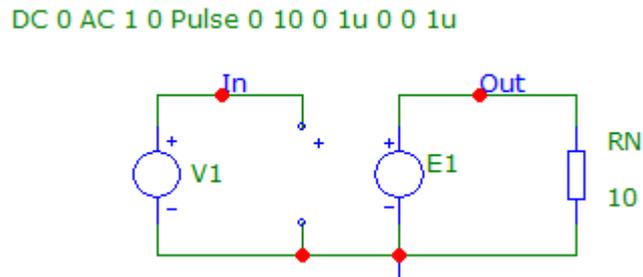


Рис. 2.8 - Схема исследования параметров зависимого источника напряжения

Зависимый источник *Dependent Source VofV* (источник  $E1$ ) находится в разделе меню *Component*  $\Rightarrow$  *Analog Primitives*  $\Rightarrow$  *Dependent Sources*  $\Rightarrow$  *VofV*. Для него необходимо задать коэффициент передачи (*Value*) равный 3.

На вход этого источника следует подать сигнал от независимого источника импульсного напряжения *Voltage Source* (источник  $V1$ , Рис. 2.9), расположенного в меню *Component*  $\Rightarrow$  *Analog Primitives*  $\Rightarrow$  *Waveform Sources*  $\Rightarrow$  *Voltage Source*.

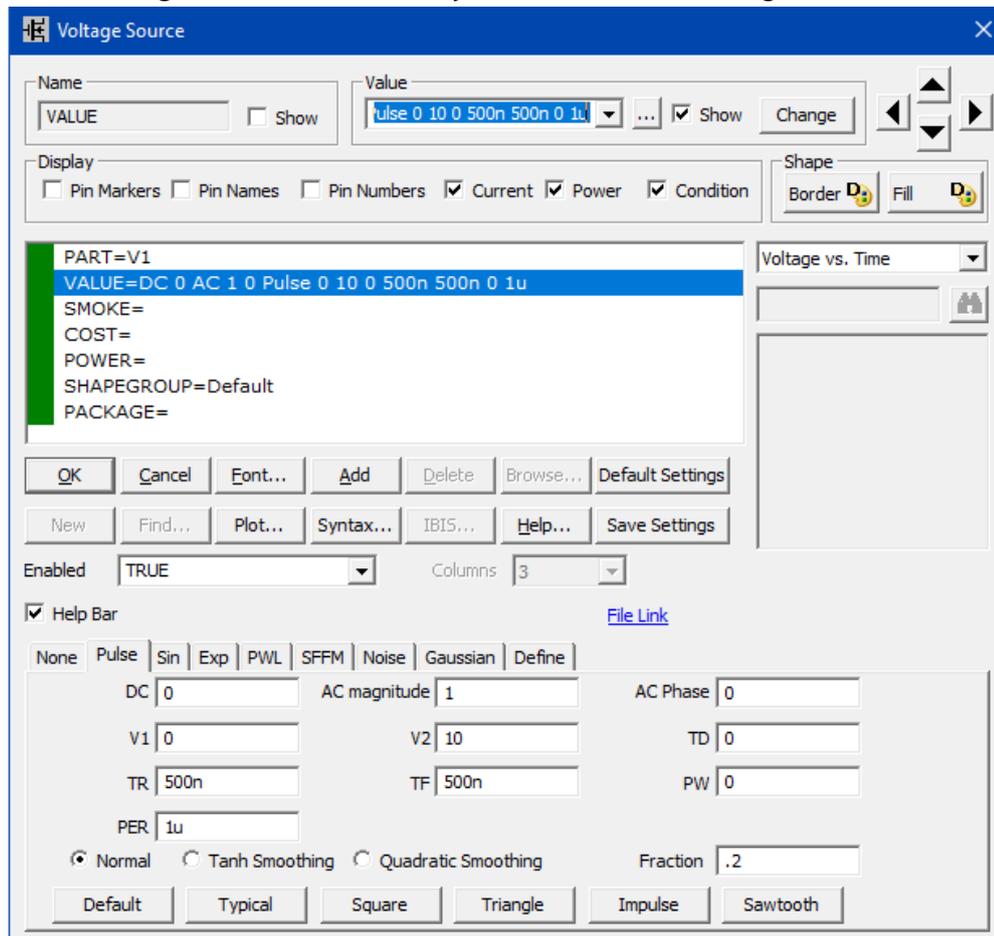


Рис. 2.9 - Задание параметров независимого источника напряжения

Этот источник должен формировать однополярные импульсы треугольной формы, амплитудой 10 В и периодом 1 мкс, его параметры  $DC\ 0\ AC\ 1\ 0\ Pulse\ 0\ 10\ 0\ 1u\ 0\ 0\ 1u$ .

Необходимо получить графики зависимости от времени входного напряжения  $V(In)$  и выходного напряжения  $V(Out)$  линейного зависимого источника  $E1$ . Для этого необходимо провести анализ в режиме *Transient*. Время расчёта 4 мкс (4 периода). Максимальный шаг расчёта 10 нс. Масштаб по оси  $Y$ : 0..30 В, шаг 5 В. Масштабы для обоих графиков одинаковые (Рис. 2.10).

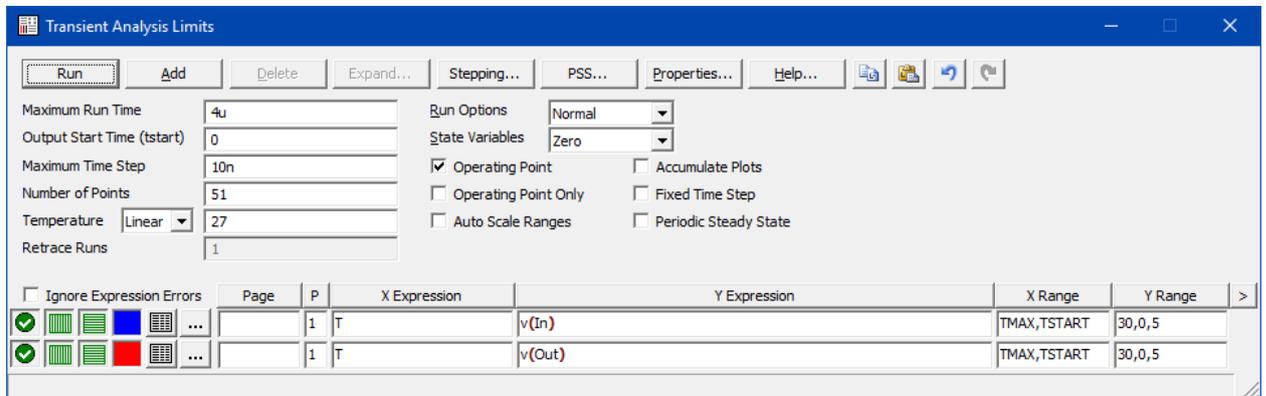


Рис. 2.10 - Параметры для получения графиков линейного зависимого источника

2. Получить график зависимости выходного напряжения от входного (передаточную характеристику зависимого источника). Для этого по оси  $X$  задать входное напряжение, по оси  $Y$  – выходное напряжение. Время расчёта 1 мкс. Масштаб по оси  $X$ : 0..10 В, шаг 2 В; по оси  $Y$ : 0..30 В, шаг 5 В. По характеристике рассчитать коэффициент передачи (отношение приращения выходного напряжения к приращению входного  $K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$ ).

3. Изменить значение параметра коэффициента передачи зависимого источника с 3 на 5. Построить передаточную характеристику (зависимость выходного напряжения от входного). Для этого необходимо провести анализ в режиме анализа *Transient*. Время расчёта 1 мкс. Масштаб по оси  $X$ : 0..10 В, шаг 2 В; по оси  $Y$ : 0..50 В, шаг 5 В. По характеристике рассчитать коэффициент передачи (отношение приращения выходного напряжения к приращению входного  $K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$ ).

### 2.2.3 Исследование делителя напряжения

1. Нарисовать в графическом редакторе программы Micro-Cap резистивную схему в соответствии с Рис. 2.11.

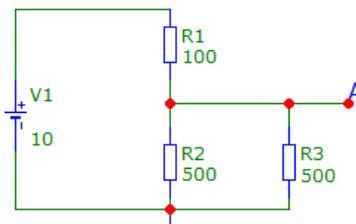


Рис. 2.11 - Схема резистивного делителя напряжения

2. Самостоятельно (или используя MathCAD [6,7]) аналитически рассчитать напряжение в точке А схемы Рис. 2.11 (относительно общего провода – «земли»).

3. Выполнить расчёт режима по постоянному току для этой схемы используя меню *Dynamic DC*. Включите кнопки **Вывод номеров узлов (Node Numbers)** и **Вывод напряжений в узлах (Node Voltages)** и нажмите **Ok** в появившемся диалоговом окне (Рис. 2.12).

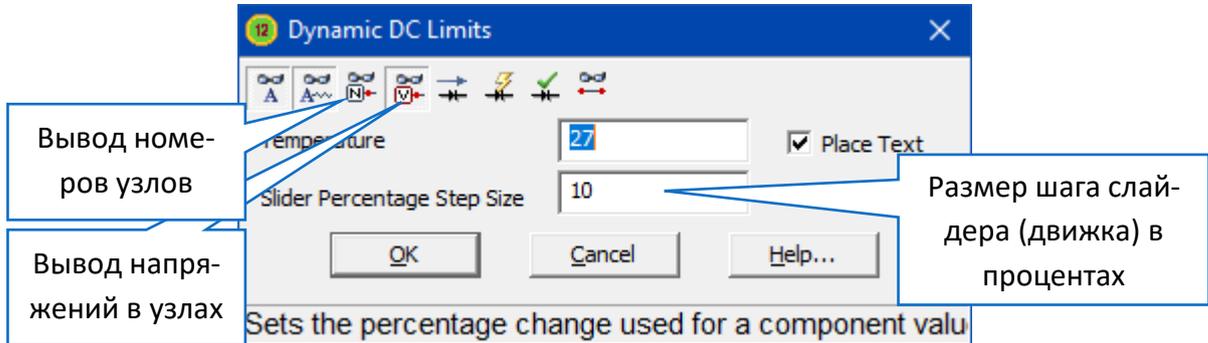


Рис. 2.12 – Окно установки параметров режима *Dynamic DC Limits*

4. Сравните напряжение в точке А со значением, рассчитанным в пункте 2.

5. Меняя сопротивление резистора  $R1$  наблюдать за изменением потенциала в точке А. Чтобы менять параметры сопротивления  $R1$  необходимо добавить слайдер с помощью команд меню *Dynamic DC > Slider > Add Slider*. В открывшемся окне (Рис. 2.13) выбирается компонент, для которого нужно добавить слайдер, а также диапазон изменения параметра компонента и дискретность этого изменения. Далее следует выделить компонент со слайдером, и затем стрелками управления курсором  $\uparrow \downarrow$  на дополнительной клавиатуре менять его параметры.

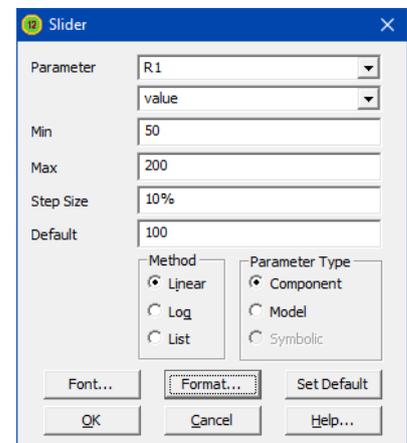


Рис. 2.13 - Окно изменения параметров слайдера

## 2.3 Контрольные вопросы

- 1) Что происходит с выходным напряжением источника напряжения, обладающего внутренним сопротивлением, при увеличении тока нагрузки?
- 2) Нарисовать общий вид нагрузочной (внешней) характеристики идеального источника напряжения.
- 3) Нарисовать общий вид нагрузочной (внешней) характеристики источника напряжения, обладающего внутренним сопротивлением.
- 4) Источник напряжения обладает внутренним сопротивлением 1 Ом. На сколько изменится напряжение этого источника при увеличении тока на 2 А?
- 5) Источник напряжения обладает внутренним сопротивлением 50 Ом. При каком сопротивлении нагрузки в ней будет рассеиваться максимальная мощность.
- 6) Чему равно внутреннее сопротивление модели источника постоянного напряжения в программе Micro-Cap?

- 7) На вход линейного зависимого источника напряжения *Dependent Source Vof V* с коэффициентом передачи 5 подано постоянное напряжение 10 В. Чему равно выходное напряжение источника, если внутреннее сопротивление равно нулю?
- 8) Нарисовать передаточную характеристику линейного зависимого источника напряжения *Dependent Source Vof V* с коэффициентом передачи 1.
- 9) На вход линейного зависимого источника напряжения *Dependent Source Vof V* с коэффициентом передачи 2 подано постоянное напряжение 5 В. Чему равно выходное напряжение источника, если внутреннее сопротивление равно 1 Ом, а ток нагрузки 2 А?
- 10) На вход линейного зависимого источника напряжения *Dependent Source Vof V* подано синусоидальное напряжение с амплитудой 5 В. Какую форму имеет выходное напряжение?
- 11) На вход линейного зависимого источника напряжения *Dependent Source Vof V* с коэффициентом передачи 2 подано синусоидальное напряжение амплитудой 10 В. Чему равна амплитуда выходного напряжения источника, если внутреннее сопротивление равно нулю?

### 3 Исследование источников тока

#### 3.1 Цели и задачи занятия:

- ознакомление с различными видами источников тока с помощью программы Micro-Cap;
- исследование параметров и характеристик независимых источников постоянного тока;
- исследование параметров и характеристик линейных зависимых источников тока.

#### 3.2 Практические задания

##### 3.2.1 Исследование независимого источника тока

1. Собрать схему исследования *идеального независимого источника постоянного тока ISource* (Рис. 3.1).

Идеальный источник тока

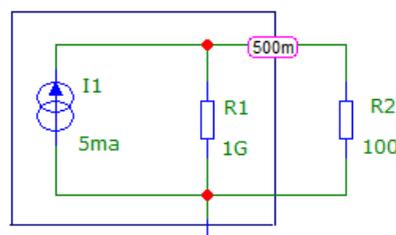


Рис. 3.1 - Схема для исследования параметров идеального независимого источника постоянного тока:  $R_1 = 1$  ГОм – внутреннее сопротивление идеального источника тока (почти  $\infty$  по сравнению с сопротивлением  $R_2$ ),  $R_2 = 100$  Ом – сопротивление нагрузки,  $I_1 = 5$  мА – величина источника постоянного тока ( $I_{Source}$ ).



Измерение токов и напряжений в режиме анализа *Dynamic DC* осуществлять аналогично пункту 2 подраздела 2.2.1. Сопротивление резистора можно менять либо непосредственно, задавая новое значение, либо выделить компонент (резистор) в режиме выполнения анализа *Dynamic DC* и стрелками на клавиатуре  $\uparrow\downarrow$  менять значение сопротивления резистора (с шагом  $\pm 10\%$  от исходного значения).

В режиме анализа *Dynamic DC* токи через компоненты и напряжения в узлах (точках соединения компонентов) выводятся непосредственно на схему.

Компоненты  $I1, R1, R2$  включены параллельно, поэтому напряжение на них одинаковое. В Micro-Cap при параллельном включении компонентов выводится общее напряжение (т.е. напряжение на одном из параллельно включённых компонентов).

3. Исследовать влияние тока нагрузки на выходное напряжение *реального источника тока*. Для этого необходимо задать сопротивление резистора  $R1$  равным 10 кОм (получить из идеального источника тока реальный). Меняя сопротивление резистора  $R2$  от 200 Ом до 2 кОм построить таблицу значений  $R2, U(R2), I(R2)$  (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Исследование влияния изменения тока нагрузки на выходное напряжение реального источника тока

$R2, \text{ Ом}$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$I(R2), \text{ А}$											
$U(R2), \text{ В}$											

4. По результатам измерений Таблица 3.1 пункта 2 построить внешнюю характеристику идеального источника тока (график зависимости напряжения на выходе источника от тока нагрузки) с использованием программы *MS Excel*.

5. По результатам измерений Таблица 3.2 пункта 3 построить внешнюю характеристику реального источника тока с использованием программы *MS Excel*.

Объяснить, почему в реальном источнике тока с ростом напряжения ток уменьшается.

6. По данным пункта 3 или соответствующему графику пункта 5 рассчитать значение внутреннего дифференциального сопротивления реального источника тока. Дифференциальное сопротивление равно отношению приращения напряжения к вызвавшему его приращению тока:  $R_{вн} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}}$ . Для рассматриваемой схемы  $R_{вн} = \Delta U(R2) / \Delta I(R2)$ . Сравнить полученное значение со значением сопротивления резистора  $R1$  пункта 3. Сделать вывод.

7. В схеме на Рис. 3.1 сопротивление  $R1$  установить равным 1 ГОм. Для резистора  $R2$  задать зависимость сопротивления резистора от времени (выражение  $1000 * t$ ). Величину тока источника  $I_{\text{Source}}$  задать по номеру варианта:  $I = NN$  мА, где  $NN$  – номер варианта. Например, для варианта №30 необходимо задать 30 мА. Скопировать полученную схему в отчёт.

Сопротивление резистора в Micro-Cap можно задавать не только в виде числового значения, но и в виде выражения. В этом случае сопротивление резистора будет меняться в зависимости от какого-либо параметра (например, от времени). Если изменять величину сопротивления, подключённого к выходу источника, то будет меняться выходной ток этого

источника. Таким образом при помощи резистора, сопротивление которого меняется с течением времени, можно получить внешнюю характеристику источника (зависимость напряжения на выходе источника от тока нагрузки).

Функциональную зависимость напряжения от времени для резистора  $R2$  схемы Рис. 3.1 можно задать, записав в поле *Value* параметров резистора выражение  $1000 * t$  (Рис. 3.4). С течением времени сопротивление этого резистора будет меняться по линейному закону (в момент 0 с оно равно 0 Ом, в момент 1 с – 1 кОм, в момент 2 с – 2 кОм и т.д.).

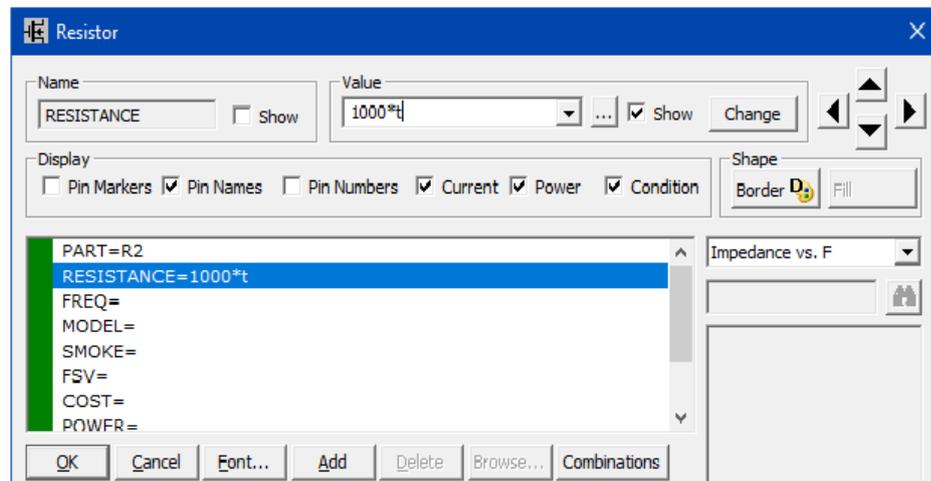


Рис. 3.4 - Задание функциональной зависимости сопротивления резистора

8. Построить внешнюю характеристику идеального источника тока (график зависимости напряжения на выходе источника от тока нагрузки). Для получения графика использовать режим анализа *Transient*. Время расчёт  $a - NN$ , максимальный шаг расчёта 1 мс. Масштаб по оси  $X$ : от 0 до  $1.1m * NN$ , шаг сетки 1, масштаб по оси  $Y$ : *AutoAlways* (автомасштабирование). Скопировать полученный график в отчёт. Сравнить общий вид полученного графика с графиком, построенным по данным из пункта 2.

Для построения графика внешней характеристики идеального источника тока (графика зависимости напряжения на выходе источника от тока нагрузки) необходимо каким-либо образом менять ток нагрузки (например, меняя сопротивление нагрузки). В рассматриваемой схеме изменение тока обеспечивается изменением сопротивления резистора  $R2$ . Для получения графика внешней характеристики необходимо использовать режим анализа *Transient*. Для этого режима необходимо задать время расчёта (*Time Range*) –  $NN$  и максимальный шаг расчёта (*Maximum Time Step*) – 1 мс. Время расчёта в рассматриваемом примере будет определять максимальную величину сопротивления резистора  $R2$  (это сопротивление задано функциональной зависимостью  $1000 * t$ )

Для построения графика зависимости напряжения от тока необходимо в графе *X Expression* указать ток через резистор  $R2$ , т.е. ввести выражение  $I(R2)$  (по умолчанию в этой графе стоит время  $T$ ), а в графе *Y Expression* указать напряжение на резисторе  $R2$ , т.е. ввести выражение  $V(R2)$  (Рис. 3.5). Вместо  $NN$  записывается число, равное номеру варианта.

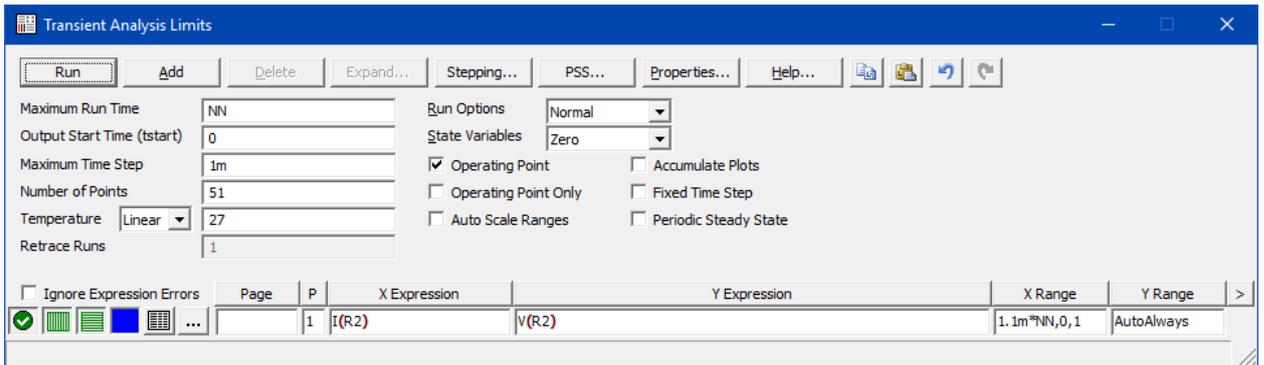


Рис. 3.5 - Параметры анализа *Transient* для построения внешней характеристики

Для правильного построения графика масштаб по оси  $X$  необходимо задать вручную (в поле  $X$  Range). Формат задания масштаба ( $X$  range и  $Y$  range):  $max, min$ , шаг сетки (запятая является разделителем!). Т.е. для задания масштаба по оси  $X$  от 0 до  $1.1m * NN$ , шага сетки 1, в поле  $X$  Range необходимо записать  $1.1m * NN, 0, 1$ .

Масштаб по оси  $Y$ : *AutoAlways* (автомасштабирование). Его можно установить, щёлкнув правой клавишей мыши по полю  $Y$  Range.

Перед выполнением анализа нужно обратить внимание на то, чтобы был отключён флажок общего автомасштабирования *Auto Scale Ranges*. Однако если из-за ошибок задания параметров компонентов или параметров анализа на график ничего не выводится (например, если не проконтролировали «полярность» резистора  $R2$ ), то включение опции автомасштабирования и анализ полученных графиков часто помогает обнаружить ошибку. Но после исправления ошибок необходимо эту опцию отключить и ввести масштаб вручную в соответствии с требованиями задания.

В схеме на рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** задать для резистора  $R1$  сопротивление  $NN * 4$  кОм ( $NN$  – номер варианта). Получится реальный источник тока (источник тока с не бесконечно большим сопротивлением). Скопировать полученную схему в отчёт.

9. Построить внешнюю характеристику реального источника тока (график зависимости напряжения на выходе источника от тока нагрузки). Для получения графика использовать режим анализа *Transient*. Параметры анализа – такие же, как и в п. 8. Скопировать полученный график в отчёт.

10. По графику внешней характеристики рассчитать внутреннее сопротивление реального источника тока. Сравнить его с сопротивлением резистора  $R1$ .

11. Построить семейство внешних характеристик реального источника тока при разных внутренних сопротивлениях источника (т.е. при разных значениях  $R1$ ). Для этого необходимо использовать окно *Stepping* режима анализа *Transient*. В нем нужно указать значения  $R1$ , для которых будут строиться графики. Значения задаются перечислением через запятую в режиме *List*:  $NN * 0.5k, NN * 1k, NN * 2k, NN * 4k, NN * 10k, NN * 80k$ . Скопировать полученные графики в отчёт. На основании анализа полученного семейства гра-

фиков сделать вывод о влиянии внутреннего сопротивления источника тока на его внешнюю характеристику. При каком значении сопротивления  $R1$  источник тока можно считать идеальным?

Для построения семейства графиков используется режим *Stepping* (многовариантный режим расчёта). Чтобы построить семейство внешних характеристик реального источника тока при разных внутренних сопротивлениях источника (т.е. при разных значениях  $R1$ ) необходимо использовать окно *Stepping* режима анализа *Transient*. В этом окне необходимо указать значения  $R1$ , для которых будут строиться графики. Значения задаются перечислением через запятую в режиме *List*:  $NN * 0.5k, NN * 1k, NN * 2k, NN * 4k, NN * 10k, NN * 80k$  (Рис. 3.6) На рисунке приведены значения для варианта  $NN = 30$ .

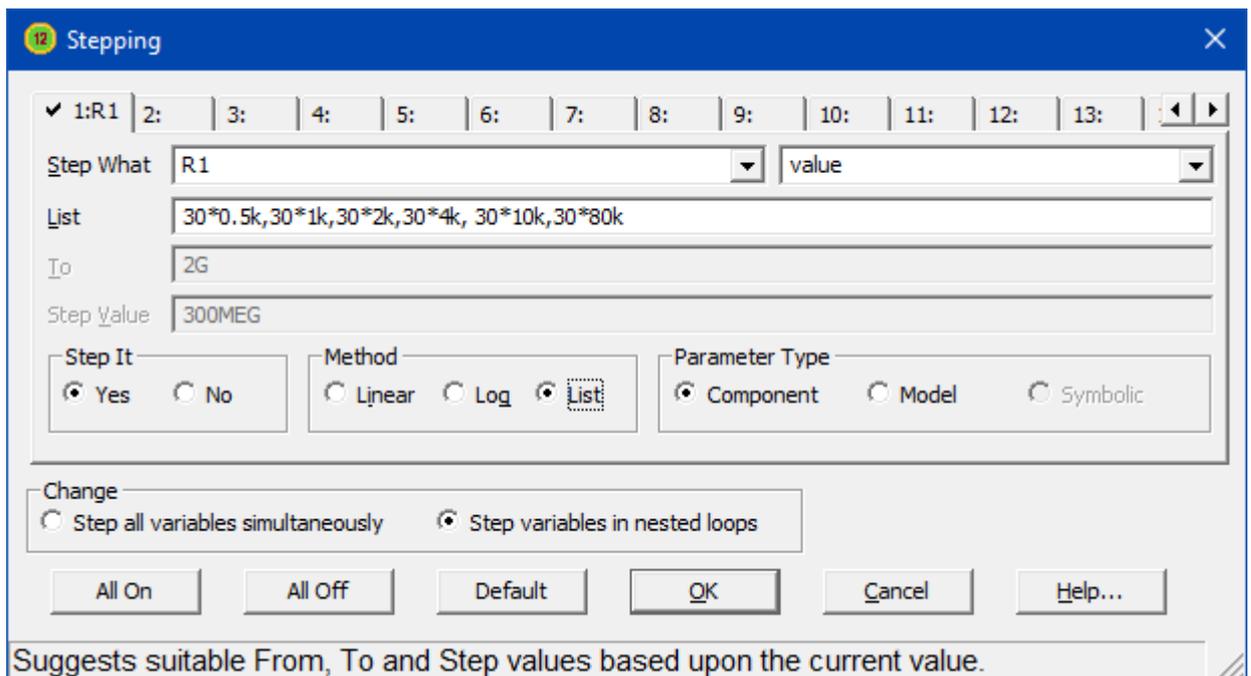


Рис. 3.6 - Задание параметров *Stepping* режима анализа *Transient*

Чтобы определить, какому именно графику соответствует каждое значение  $R1$ , необходимо после выполнения анализа *Transient* и получения графика выполнить команду *Scope*  $\Rightarrow$  *Label Branches*.

В параметрах *Label Branches* указать значение  $X$  на уровне которого нужно расставлять метки. Это значение для данного семейства графиков должно быть  $0.9m * NN$ . Например, для варианта 30, необходимо указать  $27m$ .

После построения графика необходимо отключить *Stepping*, поставив флажок *Step It* в положение «*No*» и убрать с графика метки значений  $R1$ , выполнив команду *Scope*  $\Rightarrow$  *Delete All Objects*.

12. Задать внутреннее сопротивление реального источника тока  $R1$  равным  $NN$  кОм. Построить график зависимости мощности, рассеиваемой на сопротивлении нагрузки  $R2$ , при изменении этого сопротивления от нуля до  $10 * NN$  кОм. Сопротивление резистора  $R2$  задать формулой  $(10k * t)$ . Время расчёта  $NN$ , максимальный шаг расчёта 10 мс. Масштаб по оси  $Y$ : от 0 до 8 Вт с шагом 2 Вт для гарантированного размещения графика

в окне. Для конкретного варианта лучше использовать масштаб *auto* по оси  $Y$ , затем после построения графика его можно подкорректировать. Скопировать полученный график в отчёт. Определить, при каком сопротивлении нагрузки в ней рассеивается максимальная мощность. Для определения максимального значения использовать «курсорный режим».

Для построения графика зависимости мощности, рассеиваемой на сопротивлении нагрузки  $R_2$ , от величины этого сопротивления, необходимо менять сопротивление  $R_2$  от нуля до  $10 * NN$  кОм. Для этого сопротивление резистора  $R_2$  необходимо задать выражением  $10k * t$ , а время расчёта устанавливать  $t = NN$ .

Для построения графика зависимости мощности от сопротивления используется режим анализа *Transient*. В параметрах анализа по оси  $X$  задаётся  $R(R_2)$ , по оси  $Y - I(R_2) * V(R_2)$ . Время расчёта  $NN$ , максимальный шаг  $10$  мс (в поле *Maximum Time Range* вво-

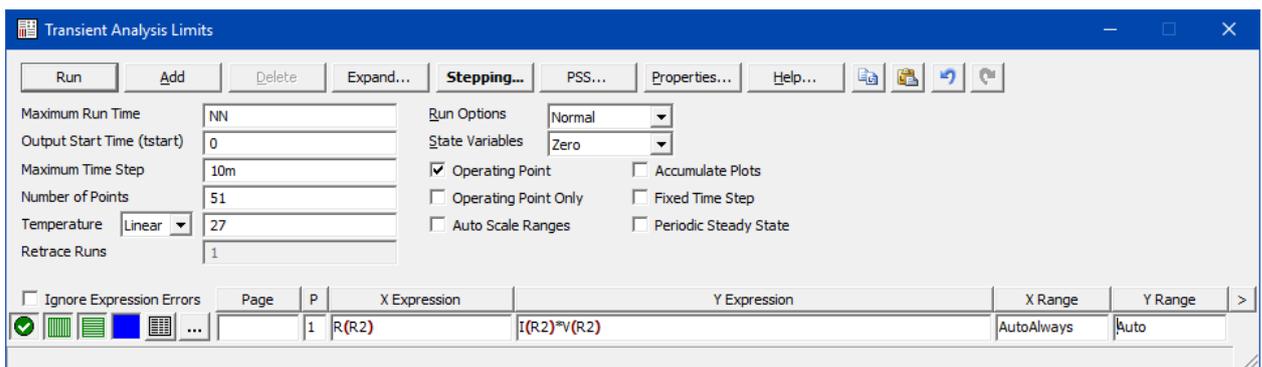


Рис. 3.7 - Параметры для получения графика зависимости мощности от сопротивления дится  $10m$ ) (Рис. 3.7).

Для правильного построения графика масштаб по оси по оси  $Y$  необходимо задать *auto*, а затем, после построения графика, подкорректировать вручную для большей наглядности (в поле *Y Range*). Формат задания масштаба: *max, min*, шаг сетки. По оси  $X$  используется автомасштабирование (*AutoAlways*).

Для определения максимального значения следует использовать «курсорный режим». В этом режиме можно использовать два курсора: один вызывается щелчком левой клавиши мыши (левый курсор), второй – щелчком правой клавиши мыши (правый курсор).

Если удерживать нажатой левую или правую клавишу мыши и перемещать курсор по полю графика, то на графике отображаются текущие координаты курсора (т.е. значения по осям). Перемещая курсор вблизи максимума графика, можно найти максимальное значение мощности и соответствующее ему значение сопротивления. Для точной установки курсора в точку максимума графика можно использовать курсорную функцию *High*, вызываемую нажатием на пиктограмму .

13. Увеличить внутреннее сопротивление источника  $R_1$  до  $2 * NN$  кОм. Построить график зависимости мощности, рассеиваемой нагрузке  $R_2$  при изменении сопротивления нагрузки от нуля до  $10 * NN$  кОм. Время расчёта  $NN$ , максимальный шаг расчёта  $100$  мс. Масштаб по оси  $Y$ : *auto*. Скопировать полученный график в отчёт.

14. Определить, при каком сопротивлении нагрузки в ней рассеивается максимальная мощность. Для определения максимального значения использовать «курсорный режим».

15. На основании результатов сделать вывод о том, при каком условии в нагрузке рассеивается максимальная мощность.

### **3.3 Контрольные вопросы**

- 1) Что происходит с выходным током идеального источника тока при увеличении сопротивления нагрузки?
- 2) Что происходит с выходным напряжением идеального источника тока при уменьшении сопротивления нагрузки?
- 3) Нарисовать общий вид нагрузочной (внешней) характеристики идеального источника тока.
- 4) Чему равно внутреннее сопротивление идеального источника тока?
- 5) Нарисовать общий вид нагрузочной (внешней) характеристики источника тока, обладающего не бесконечным внутренним сопротивлением.
- 6) Источник тока обладает внутренним сопротивлением 10 кОм. При каком сопротивлении нагрузки в ней будет рассеиваться максимальная мощность?
- 7) Чему равно внутреннее сопротивление модели источника постоянного тока в программе Micro-Cap?

## **4 Исследование модели резистора в Micro-Cap**

### **4.1 Цели и задачи занятия:**

- исследование параметров и характеристик модели идеального линейного резистора.
- исследование параметров и характеристик в модели реального линейного резистора.
- исследование параметров и характеристик модели идеальных нелинейных резисторов.

## 4.2 Практические задания

### 4.2.1 Исследование идеального линейного резистора

1. Нарисовать в редакторе программы Micro-Cap схему с идеальной моделью линейного резистора (Рис. 4.1). Сопротивление резистора  $100 * NN$  Ом, где  $NN$  – номер варианта (номер в журнале посещаемости). Источник  $V1$  – источник постоянного напряжения (батарея). Напряжение источника  $10 * NN$  В. Указать на схеме группу и номер варианта.

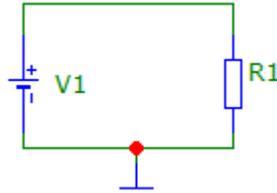


Рис. 4.1 - Схема исследования параметров резистора по постоянному току

2. Аналитически рассчитать ток резистора  $R1$ .

3. Выполнить расчёт режима по постоянному току для этой схемы (*Analysis*  $\Rightarrow$  *Dynamic DC*). Схему с указанными напряжениями в узлах и токами через компоненты скопировать в отчёт. Сравнить ток через резистор  $R1$  со значением, рассчитанным в пункте 2.

4. Построить график тока через резистор, выполнив анализ переходных процессов *Transient*. Время расчёта 4 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученный график скопировать в отчёт.

5. Заменить источник постоянного напряжения  $V1$  универсальным источником напряжения *Voltage Source* (Рис. 4.2). Указать на схеме группу и номер варианта.

В универсальном источнике *Voltage Source* перейти на вкладку *Sin* (формирование синусоидального напряжения). Задать амплитуду синусоидального напряжения  $10 * NN$  В, а частоту – 1 МГц. Остальные параметры источника – по умолчанию.

6. Построить графики напряжения на резисторе и тока через резистор, выполнив анализ переходных процессов *Transient*. Время расчёта 4 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт.

7. Построить зависимость напряжения на резисторе от тока через резистор, выполнив анализ переходных процессов *Transient*. При построении графика по оси  $X$  задать ток через резистор, по оси  $Y$  – напряжение на резисторе. Время расчёта 4 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученный график скопировать в отчёт. Объяснить вид полученного графика.

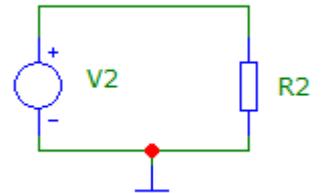


Рис. 4.2 - Схема исследования параметров резистора по переменному току

8. В универсальном источнике *Voltage Source* перейти на вкладку *Pulse* (формирование периодических импульсов). Задать импульс со следующими параметрами: амплитуда импульса  $10 * NN$  В, длительность фронта и среза 20 нс, длительность импульса 1 мкс, период 2 мкс.

9. Построить графики напряжения на резисторе и тока через резистор, выполнив анализ переходных процессов *Transient*. Время расчёта 4 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт.

10. Сравнить форму тока с формой напряжения в п. 6 и форму тока с формой напряжения в п. 7. Сделать вывод о связи формы тока и напряжения в идеальном линейном резисторе.

#### 4.2.2 Исследование реального линейного резистора

Нарисовать в редакторе программы Micro-Cap схему исследования параметров реальной модели резистора (Рис. 4.3). Для этого схему Рис. 4.2 нужно дополнить резистором  $R2$ .

Задать сопротивления резисторов  $R1$  и  $R2$  равными 1 Ом. В универсальном источнике *Voltage Source* перейти на вкладку *Sin* (формирование синусоидального напряжения). Параметры источника как в п. 5 (т.е. ничего менять не надо).

Зайти в окно задания параметров резистора  $R2$  и задать для него какое-либо имя модели, например, *RES* (т.е. задать *MODEL = RES*). При этом активизируется окно задания паразитных параметров резистора и можно получить модель реального резистора, задав для него паразитную параллельную ёмкость *CP* или паразитную последовательную индуктивность *LS* (или и, то и другое вместе).

Задать паразитную последовательную индуктивность *LS* равной 200 нГн. На одном графике построить напряжение на резисторе  $R1$ , а на втором – токи через резистор  $R1$  (идеальный резистор) и  $R2$  (реальный резистор), выполнив анализ переходных процессов *Transient*). Время расчёта 4 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт. Описать, чем отличаются графики тока идеального и реального резисторов.

В универсальном источнике *Voltage Source* перейти на вкладку *Pulse* (формирование периодических импульсов). Задать импульс со следующими параметрами: амплитуда импульса  $10 * NN$  В, длительность фронт и среза 20 нс, длительность импульса 1 мкс, период 2 мкс. Выполнить анализ переходных процессов *Transient*. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт. Пояснить, как изменилась форма тока при наличии у резистора паразитной индуктивности. Сделать вывод о влиянии паразитной индуктивности в резисторах с малым сопротивлением.

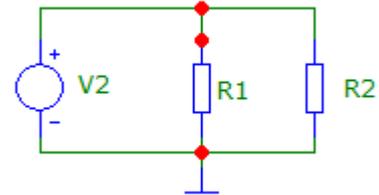


Рис. 4.3 - Схема исследования реальной модели резистора

Задать паразитную последовательную индуктивность  $LS$  неопределённой (*undefined*), а паразитную параллельную ёмкость  $CP$  равной 10 пФ. Выполнить анализ переходных процессов *Transient*. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт. Сравнить форму токов в идеальном и реальном резисторах. Сделать вывод о влиянии паразитной ёмкости в резисторах с малым сопротивлением.

Задать сопротивление резисторов  $R1$  и  $R2$  равными 1 кОм. Для  $R2$  задать паразитную последовательную индуктивность  $LS$  равной 200 нГн, а паразитную параллельную ёмкость  $CP$  равной 0. Выполнить анализ переходных процессов *Transient*. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт. Сравнить форму токов в идеальном и реальном резисторах. Сделать вывод о влиянии паразитной индуктивности в резисторах с высоким сопротивлением.

Задать паразитную последовательную индуктивность  $LS$  неопределённой (*undefined*), а паразитную параллельную ёмкость  $CP$  равной 10 пФ. Выполнить анализ переходных процессов *Transient*. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт. Сравнить форму токов в идеальном и реальном резисторах. Сделать вывод о влиянии паразитной ёмкости в резисторах с высоким сопротивлением.

Задать паразитную последовательную индуктивность  $LS$  равной 200 нГн, а паразитную параллельную ёмкость  $CP$  равной 10 пФ. Выполнить анализ переходных процессов *Transient*. Указать на графике группу и номер варианта. Полученные графики скопировать в отчёт. Сравнить форму токов в идеальном и реальном резисторах. Сделать вывод о совместном влиянии паразитной ёмкости и индуктивности в резисторах с высоким сопротивлением.

#### 4.2.3 Исследование моделей идеальных нелинейных резисторов

Нарисовать в редакторе программы Micro-Cap схему исследования параметров нелинейной модели резистора (Рис. 4.4). Для этого из схемы Рис. 4.3 следует удалить резистор  $R2$ .

В универсальном источнике *Transient* перейти на вкладку *Sin* (формирование синусоидального напряжения. Задать сопротивление резистора  $R1$  выражением  $0.1 + 50k * T$  (нелинейный резистор, сопротивление которого зависит от времени  $T$ ). Построить графики напряжения на резисторе, тока через резистор и сопротивления резистора ( $R(R1)$ ), выполнив анализ переходных процессов *Transient*. Время расчёта 20 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученный график скопировать в отчёт. Объяснить вид полученных графиков тока и сопротивления.

Задать сопротивление резистора выражением  $50 + ABS(10 * V(R1))$  (нелинейный резистор, сопротивление которого зависит от напряжения на нем). Построить графики

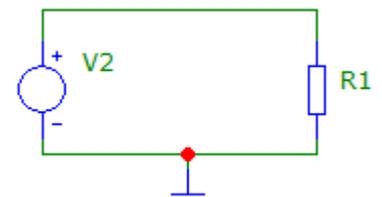


Рис. 4.4 - Схема исследования нелинейной идеальной модели резистора

напряжения на резисторе, тока через резистор и сопротивления резистора ( $R(R1)$ ), выполнив анализ переходных процессов *Transient*). Время расчёта 4 мкс, максимальный шаг расчёта 1 нс, масштаб – автоматический. Указать на графике группу и номер варианта. Полученный график скопировать в отчёт. Объяснить вид полученных графиков тока и сопротивления.

Построить зависимость напряжения на резисторе от тока через резистор, выполнив анализ переходных процессов *Transient*. Указать на графике группу и номер варианта. Полученный график скопировать в отчёт. Сравнить с графиком из п. 7 (зависимость тока от напряжения для линейного резистора). Сделать вывод.

### 4.3 Контрольные вопросы

- 1) Каким параметром характеризуется модель идеального резистора?
- 2) Какими паразитными параметрами обладают реальные резисторы?
- 3) Из-за чего реальный резистор обладает паразитными параметрами? Что влияет на их величину?
- 4) Нарисовать модель (эквивалентную схему) реального резистора с сосредоточенными параметрами.
- 5) Какой из паразитных параметров влияет на работу высокоомных резисторов (резисторов с большим сопротивлением), а каким можно пренебречь?
- 6) Нарисовать модель (эквивалентную схему) реального высокоомного резистора.
- 7) Какой из паразитных параметров влияет на работу низкоомных резисторов (резисторов с малым сопротивлением), а каким можно пренебречь?
- 8) Нарисовать модель (эквивалентную схему) реального низкоомного резистора.
- 9) Как задать модель реального резистора в программе Micro-Cap?
- 10) Как в программе Micro-Cap задать модель резистора, сопротивление которого линейно зависит от напряжения в узле 1?
- 11) Как в программе Micro-Cap задать модель резистора, сопротивление которого линейно зависит от тока через резистор  $R1$ ?
- 12) Как в программе Micro-Cap задать модель резистора, сопротивление которого зависит от времени?
- 13) Как в программе Micro-Cap построить график зависимости сопротивления  $R1$  от времени?
- 14) Как в программе Micro-Cap построить график зависимости сопротивления  $R1$  от напряжения на этом резисторе?
- 15) Как в программе Micro-Cap построить график зависимости сопротивления  $R1$  от тока через этот резистор?

## 5 Исследование модели конденсатора в Micro-Cap

### 5.1 Цели и задачи занятия:

- исследование параметров и характеристик модели идеального конденсатора.

- исследование параметров и характеристик модели реального конденсатора.

## 5.2 Практические задания

### 5.2.1 Исследование модели идеального конденсатора (без паразитных параметров)

1. Собрать схему для исследования процессов в конденсаторе при подключении источника постоянного напряжения (Рис. 5.1). Напряжение источника 10 В. Сопротивление резистора  $R1 = 1$  кОм. Ёмкость конденсатора  $C1$  равна номеру варианта (в мкФ).

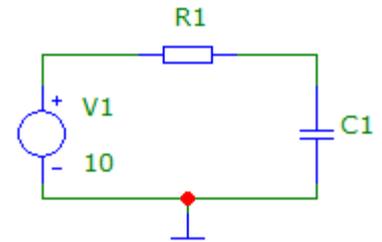


Рис. 5.1 - Схема для исследования идеального конденсатора с батареей

2. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 5 \cdot R1 \cdot C1$ . Обязательно отключить флажок *Operating Point*.

3. По графику определить, за какое время конденсатор зарядится до 95 % от установившегося значения. Определить максимальный ток заряда конденсатора.

4. Поменять сопротивление резистора.  $R1=100$  Ом. Выполнить анализ переходных процессов *Transient* и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 5 \cdot R1 \cdot C1$ .

5. По графику определить, за какое время конденсатор зарядится до 95 % от установившегося значения. Определить максимальный ток заряда конденсатора.

6. Собрать схему для исследования процессов в конденсаторе при подключении источника переменного (синусоидального) напряжения (Рис. 5.2). Амплитуда синусоидального сигнала 10 В, частота 100 Гц. (DC 0 AC 1 0 Sin 0 10 100 0 0 0). Ёмкость конденсатора  $C1$  равна номеру варианта (в мкФ).

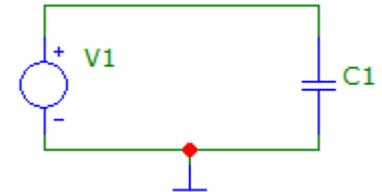


Рис. 5.2 - Схема для исследования конденсатора с источником переменного напряжения

7. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 2$  периода синусоидального сигнала.

8. По графику определить максимальную амплитуду тока. По результатам измерений вычислить действующие значения тока и напряжения:

$$I = \frac{I_{MAX}}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot I_{MAX},$$

$$U = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot U_{MAX}$$

9. Вычислить реактивное сопротивление конденсатора:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}.$$

10. Рассчитать реактивное сопротивление конденсатора на частоте 100 Гц. Сравнить результат с тем, что получен в п. 9.

11. В источнике V1 поменять закладку *Sin* на *Pulse*. Задать в источнике треугольное напряжение амплитудой 10 В. Время нарастания напряжения 1 мс, время спада 1 мс, период 2 мс. (*DC 0 AC 1 0 Pulse 0 10 0 1m 1m 0 2m*).

12. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчета  $t = 2$  периода треугольного сигнала.

13. По графику определить амплитуду тока через конденсатор.

14. Составить линейную функцию, описывающую один из участков (нарастание) треугольного напряжения. Используя эту функцию, вычислить амплитуду тока через конденсатор. Сравнить с результатами из п. 13.

15. В источнике V1 задать прямоугольное напряжение амплитудой 10 В. Время нарастания напряжения 20 мкс, время спада 20 мкс, длительность вершины 1 мс, период 2 мс. (*DC 0 AC 1 0 Pulse 0 10 0 20u 20u 1m 2m*).

16. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 2$  периода прямоугольного сигнала.

17. По графику определить амплитуду тока через конденсатор.

18. В источнике V1 уменьшить время нарастания и спада напряжения до 1 мкс, (*DC 0 AC 1 0 Pulse 0 10 0 1u 1u 1m 2m*).

19. По графику определить амплитуду тока через конденсатор, сравнить с результатами п. 17. Объяснить, почему увеличилась амплитуда тока.

### 5.2.2 Исследование модели конденсатора с паразитными параметрами

1. Задать в схеме Рис. 5.2 для конденсатора C1 модель, например, 2018. Задать в модели последовательное сопротивление  $RS = 1$  Ом. Параметры прямоугольного напряжения — те же, что и в п. 19 предыдущего подраздела.

2. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 2$  периода прямоугольного сигнала.

3. По графику определить амплитуду тока через конденсатор. Сравнить с результатом п. 19. Объяснить, почему уменьшилась амплитуда тока.

4. Задать в модели конденсатора C1 последовательное сопротивление  $RS=0.1$  Ом и последовательную индуктивность  $LS=5$  мкГн.

5. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 2$  периода прямоугольного сигнала.

6. По графику определить амплитуду тока через конденсатор. Объяснить причину возникновения синусоидальных колебаний.

7. Задать в источнике V1 треугольное однополярное напряжение амплитудой 10 В. Время нарастания напряжения 1 мс, время спада – 1 мс, период – 2 мс. (DC 0 AC 1 0 Pulse 0 10 0 1m 1m 0 2m).

8. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 2$  периода треугольного сигнала.

9. В источнике V1 поменять закладку *Pulse* на *Sin*. Амплитуда синусоидального сигнала 10 В, частота 500 Гц. (DC 0 AC 1 0 Sin 0 10 500 0 0 0).

10. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на конденсаторе и тока через конденсатор. Время расчёта  $t = 4$  периода синусоидального сигнала.

### 5.3 Контрольные вопросы

- 1) Каким параметром характеризуется модель идеального конденсатора?
- 2) Какими паразитными параметрами обладают реальные конденсатора?
- 3) Из-за чего реальный конденсатора обладает паразитными параметрами? Что влияет на их величину?
- 4) Нарисовать модель (эквивалентную схему) реального конденсатора с сосредоточенными параметрами.
- 5) Как задать модель реального конденсатора в программе Micro-Cap?
- 6) Как в программе Micro-Cap задать модель конденсатора, ёмкость которого линейно зависит от напряжения в узле 1?
- 7) Как в программе Micro-Cap задать модель конденсатора, ёмкость которого линейно зависит от тока через резистор R1?
- 8) Как в программе Micro-Cap задать модель конденсатора, ёмкость которого зависит от времени?
- 9) Как в программе Micro-Cap построить график зависимости ёмкости C1 от времени?
- 10) Как в программе Micro-Cap построить график зависимости ёмкости C1 от напряжения на этом конденсаторе?
- 11) Как в программе Micro-Cap построить график зависимости ёмкости C1 от тока через этот конденсатор?

## 6 Исследование модели индуктивности в Micro-Cap

### 6.1 Цели и задачи занятия:

- исследование параметров и характеристик идеальной катушки индуктивности;
- исследование параметров и характеристик реальной линейной катушки индуктивности.

## 6.2 Практические задания

6.2.1 Исследование модели идеальной катушки индуктивности (без паразитных параметров).

1. Собрать схему для исследования процессов в катушке индуктивности при подключении источника постоянного напряжения (Рис. 6.1). Напряжение источника 10 В. Сопротивление резистора  $R1 = 1$  кОм. Индуктивность катушки  $L1$  100 мкГн. Записать в поле схемы группу и номер варианта.

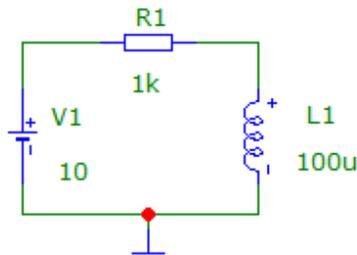


Рис. 6.1 — Схема для исследования идеальной катушки индуктивности

2. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Время расчёта 100 мкс. Обязательно отключить флажок *Operating Point*. В поле графиков укажите группу и номер варианта.

3. По графику определить время установления  $t_{уст}$  (время завершения переходных процессов) – время, за какое время ток через катушку индуктивности достигнет до 95 % от установившегося значения.

4. Проверить условие завершения переходных процессов в схеме:  $t_{уст} \approx 3\tau = 3L/R$ .

5. Установить сопротивление резистора  $R1 = 100$  Ом. Выполнить анализ переходных процессов *Transient* и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Время расчёта  $t = 10$  мкс.

6. По графику определить время установления  $t_{уст}$  (время завершения переходных процессов) – время, за какое время ток через катушку индуктивности достигнет до 95 % от установившегося значения.

7. Проверить условие завершения переходных процессов в схеме:

$$t_{уст} \approx 5\tau = \frac{5L}{R}.$$

8. Собрать схему для исследования процессов в индуктивности при подключении источника переменного (синусоидального) напряжения (Рис. 6.2). Источник  $V1$  типа *Voltage Source*, вкладка *SIN*. Амплитуда синусоидального сигнала  $VA = 10$  В, частота  $F0 = 100$  Гц. Индуктивность катушки  $L1 = 10$  мГн.

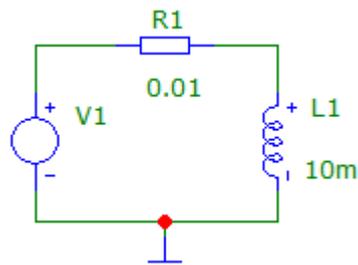


Рис. 6.2 – Схема для исследования катушки индуктивности с источником переменного напряжения

9. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Время расчёта установить равным трём периодам синусоидального сигнала. В поле графиков указать группу и номер варианта.

10. По графику определить максимальную амплитуду тока. По результатам измерений вычислить действующие значения тока и напряжения:

$$I = \frac{I_{MAX}}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot I_{MAX},$$

$$U = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} \approx 0.707 \cdot U_{MAX}$$

11. Используя полученные результаты вычислить реактивное сопротивление индуктивности:

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L}.$$

12. Рассчитать реактивное сопротивление конденсатора на частоте 100 Гц:

$$Z_L = 2\pi \cdot f \cdot L.$$

Сравнить с результатом, полученным в п. 11.

13. В источнике *V1* поменять закладку *Sin* на *Pulse*. Задать в источнике прямоугольное двуполярное напряжение.  $V1 = -10, V2 = 10$  В. Время нарастания напряжения  $TR = 20$  мкс, время спада  $TF = 20$  мкс, длительность импульса  $PW = 1$  мс, период  $PER = 2$  мс. Задержка  $TD=0$ .

14. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на катушке *L1* и тока через катушку *L1*. Время расчёта – три периода прямоугольного сигнала. По графику определить амплитуду тока через катушку *L1*.

15. Заменить источник напряжения  $V1$  источником тока  $I1$  (источник типа *Current Source*) (Рис. 6.3). Задать в источнике треугольный ток с амплитудой  $I2 = 1$  А. Время нарастания напряжения  $TR = 1$  мс, время спада  $TF = 1$  мс, период  $PER = 2$  мс. Задержка  $TD = 0$ , длительность вершины  $PW = 0$ , начальное значение тока  $I1=0$

DC 0 AC 1 0 Pulse 0 1 0 1mc 1mc 0 1u

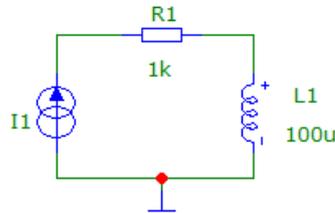


Рис. 6.3 – Схема для исследования катушки индуктивности с источником переменного тока

Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Время расчета установить равным трём периодам сигнала. В поле графиков указать группу и номер варианта. Определить амплитуду напряжения на катушке индуктивности.

16. Составить линейную функцию, описывающую один из участков (нарастание) треугольного тока. Используя эту функцию, вычислить амплитуду напряжения на катушке индуктивности:

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt}$$

### 6.2.2 Исследование модели конденсатора с паразитными параметрами

1. Для схемы Рис. 6.3 задать в источнике  $I1$  формирование прямоугольных импульсов тока (начальное значение тока  $I1 = 0$ , амплитуда импульсов тока  $I2 = 1$  А, задержка  $TD = 0$ , время нарастания импульса  $TR = 30$  мкс, время спада импульса  $TD=30$  мкс, длительность вершины импульса  $PW = 1$  мс, период  $PER = 2$  мс).

2. Выполнить анализ переходных процессов (*Transient*) и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Время расчёта установить равным двум периодам прямоугольного сигнала.

3. Для катушки индуктивности  $L1$  в поле *MODEL* задать какое-либо имя модели, например, 2018. Задать в модели последовательное сопротивление  $RS = 30$  Ом. Выполнить анализ переходных процессов и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Объяснить причины изменения формы напряжения на катушке.

4. Для катушки индуктивности  $L1$  в поле *Model* задать последовательное сопротивление  $RS = 30$  Ом и паразитную ёмкость  $Cp = 1$  нФ. Выполнить анализ переходных процессов и получить временные диаграммы напряжения на катушке и тока через катушку. Объяснить причину возникновения затухающих синусоидальных колебаний.

## 7 Спектральный анализ сигналов периодических и непериодических сигналов

### 7.1 Цели и задачи занятия:

- исследование спектральных характеристик различных непериодических сигналов.
- исследование спектральных характеристик различных периодических сигналов.

### 7.2 Практические задания

#### 7.2.1 Исследование непериодических сигналов

1. Запустить программу Micro-Cap
2. Задать директивой *.Define* номер варианта. Для этого в поле схемы ввести текст (начиная с точки!): *.Define NN* «номер варианта». Например, для варианта №30 вводится директива *.Define NN 30* Рис. 7.1)

3. В окне схемного редактора собрать схему (Рис. 7.2) для снятия спектральных характеристик сигналов различной формы (непериодических сигналов). Для задания формы сигнала используется функциональный источник напряжения:

*NFV – Component ⇒ Analog Primitives ⇒ Function Sources ⇒ NFV.*

4. Задать в качестве сигнала одиночный прямоугольный импульс амплитудой 4 В и длительностью  $(2/NN)$  мс. Для этого в позиции *Value* окна задания параметров функционального источника *E1* следует набрать:  $4 * (t \leq 2m/NN)$ .

5. Запустить анализ переходных процессов *Transient* и задать время моделирования, равное  $20 \text{ мс}/NN$ . Минимальный шаг расчёта задать  $1 \text{ мкс}/NN$ . В разных графических окнах задать вывод следующих графиков:

- зависимости заданного сигнала  $V(E1)$  от времени  $t$ ;
- спектра исследуемого сигнала (зависимости величины гармоник  $HARM(V(E1))$  от частоты  $f$ ). Задать диапазон частот выводимых гармоник от 0 до  $(5 * NN)$  кГц (Рис. 7.3).

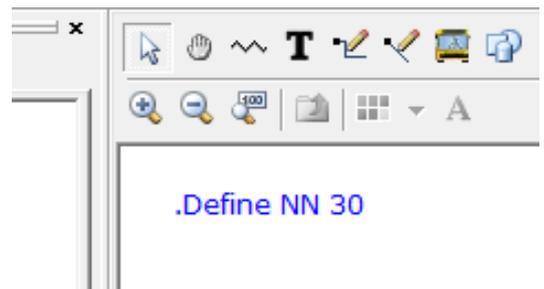


Рис. 7.1 - Ввод номера варианта

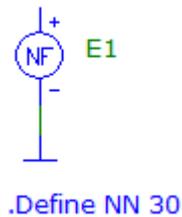
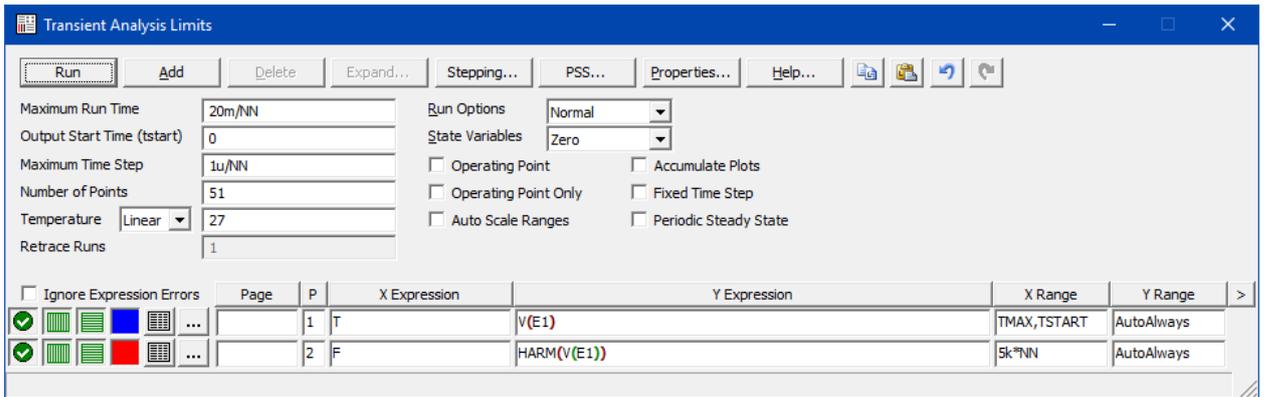


Рис. 7.2 - Схема для исследования спектров различных сигналов

Рис. 7.3 - Параметры анализа *Transient*

6. Занести получившиеся графики в отчёт. При построении графиков обратить внимание, что в отчёте чётко должны быть видны масштабы по осям (Рис. 7.4)

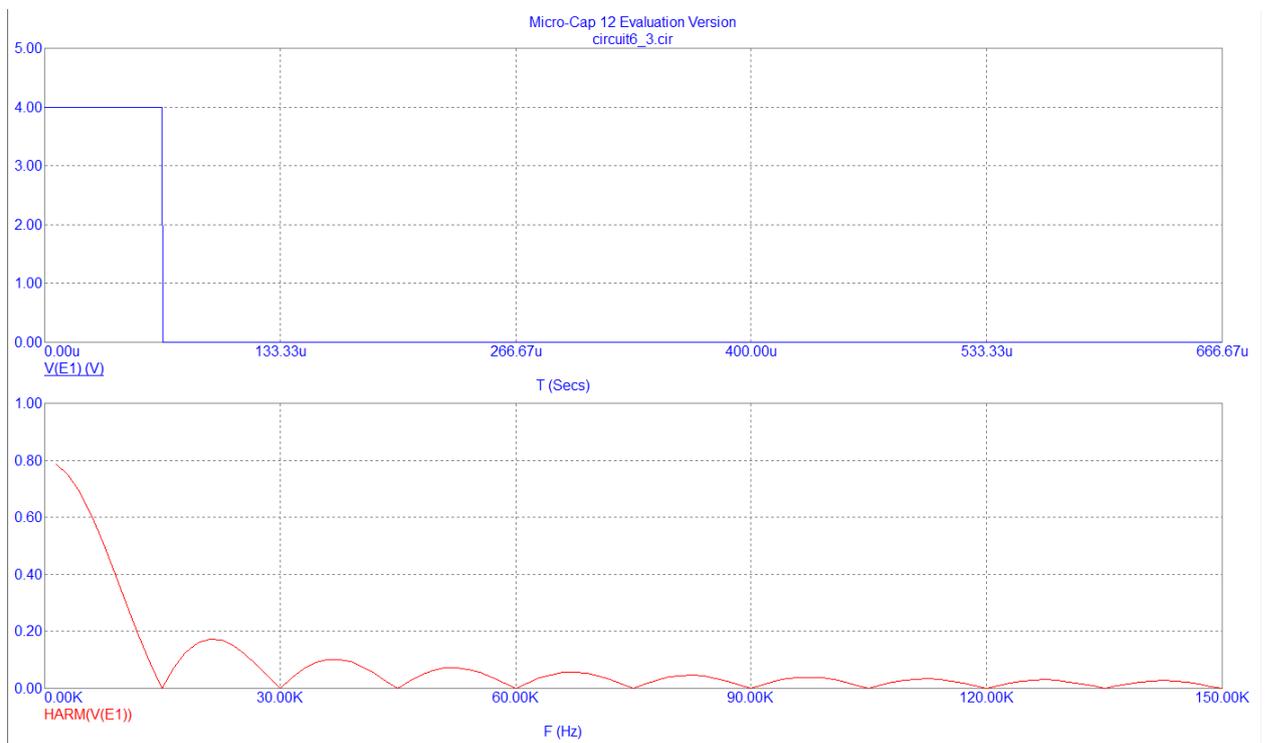


Рис. 7.4 - Пример построения графиков

Найти по графику гармонику с максимальной амплитудой. Определить её амплитуду и частоту. Определить амплитуду нулевой гармоники (постоянной составляющей).

7. Найти спектр сигнала, состоящего из четырёх равноотстоящих прямоугольных импульсов со скважностью 5, частотой  $2/NN$  кГц и амплитудой 1 В. Для этого в позиции *Value* окна задания параметров функционального источника E1 следует набрать:

$$1 * (t \geq 0) - 1 * (t \geq 0.1m/NN) + 1 * (t \geq .5m/NN) - 1 * (t \geq .6m/NN) + 1 * (t \geq 1m/NN) - 1 * (t \geq 1.1m/NN) + 1 * (t \geq 1.5m/NN) - 1 * (t \geq 1.6m/NN)$$

(можно не набирать заново, а скопировать из этого описания).

Для этой формы сигнала повторить выполнение пп. 4, 5.

8. Исследовать спектр экспоненциально затухающего синусоидального сигнала частотой 1 кГц. Для этого в позиции *Value* окна задания параметров функционального источника *E1* следует набрать:

$$\exp(-800 * t * NN) * \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN)$$

Повторить выполнение пп. 4, 5. Если при построении графиков автомасштабирование сработало некорректно (амплитуды гармоник выходят за поле графика), то масштаб по оси *Y* (*Y Range*) необходимо установить вручную.

9. Исследовать спектр прямоугольного радиоимпульса, образованного отрезком трёх синусоид частотой 1 кГц. Для этого в позиции *Value* окна задания параметров функционального источника *E1* следует набрать:

$$\sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t \geq 0) - \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t \geq 3m/NN)$$

Затем следует для этой формы сигнала повторить выполнение пп. 4, 5. Если при построении графиков автомасштабирование сработало некорректно (амплитуды гармоник выходят за поле графика), то масштаб по оси *Y* (*Y Range*) необходимо установить вручную.

10. Исследовать спектр серии трёх прямоугольных радиоимпульсов с гармоническим заполнением частотой  $1 * NN$  кГц. Для этого в позиции *Value* окна задания параметров функционального источника *E1* следует набрать:

$$\begin{aligned} & \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t \geq 0) - \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t > \\ & = 3m/NN) + \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t > \\ & = 4m/NN) - \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t > \\ & = 7m/NN) + \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t > \\ & = 8m/NN) - \sin(2 * PI * 1E3 * t * NN) * (t \geq 11m/NN) \end{aligned}$$

Затем следует для этой формы сигнала повторить выполнение пп. 4, 5.

11. Изменить время анализа переходных процессов при анализе спектра серии 3-х радиоимпульсов на  $200/NN$  мс. Получить спектр. Занести его в отчёт.

## 7.2.2 Исследование периодических сигналов

1. Построить схему для исследования спектра периодических сигналов. Для задания формы сигнала используется источник напряжения *Voltage Source*:

*Component* ⇒ *Analog Primitives* ⇒ *Waveform Sources* ⇒ *Voltage Source* (Рис. 7.5).

2. Задать в качестве сигнала синусоидальный сигнал амплитудой 10 В и частотой  $1k * NN$ . Для этого в поле *Value* окна задания параметров этого источника можно задать *DC 0 AC 1 0 Sin 0 10 1k \* NN 0 0 0* (скопировать строку параметров из этого файла).

3. Запустить анализ переходных процессов *Transient* и задать время моделирования, равное  $1 \text{ мс} / NN$ . Минимальный шаг расчёта задать  $1 \text{ мкс} / NN$ . В разных графических окнах задать вывод следующих графиков:

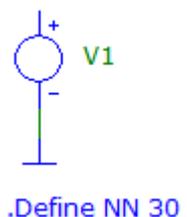


Рис. 7.5 - Схема для исследования спектров различных периодических сигналов

- зависимости заданного сигнала  $V(V1)$  от времени  $t$ ;
- спектра исследуемого сигнала (зависимости величины гармоник  $HARM(V(V1))$  от частоты  $f$ ). Задать диапазон частот выводимых гармоник от 0 до  $(10 * NN)$  кГц (Рис. 7.6)

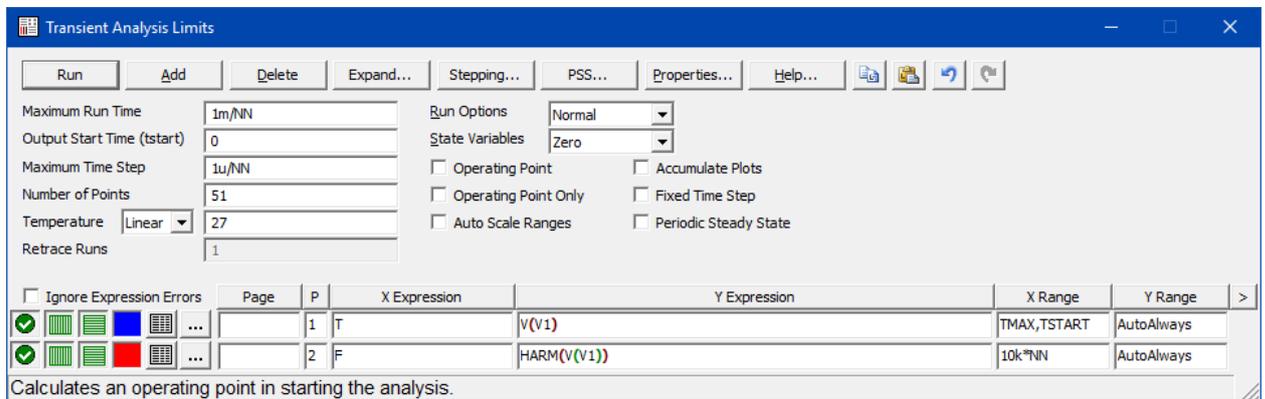


Рис. 7.6 - Параметры для исследования спектров различных периодических сигналов

4. Занести получившиеся графики в отчёт.

5. Задать в качестве сигнала синусоидальный сигнал амплитудой 10 В и частотой  $1k * NN$  и постоянной составляющей 5 В. Для этого в поле *Value* окна задания параметров этого источника можно задать `DC 0 AC 1 0 Sin 5 10 1k * NN 0 0 0` (скопировать строку параметров из этого файла).

6. Повторить выполнение пп. 3, 4.

7. Объяснить причины изменения спектрального состава по сравнению с п. 3.

8. Задать в качестве сигнала периодическую последовательность симметричных прямоугольных импульсов со скважностью 2. Амплитуда импульсов – 5 В, длительность импульса  $1m/NN$ , период  $2m/NN$ , длительность фронта и среза  $1u/NN$ . Для этого в поле *Value* окна задания параметров этого источника можно задать `DC 0 AC 1 0 Pulse – 5 5 0 1u/NN 1u/NN 1m/NN 2m/NN` (можно скопировать из этого файла).

9. Повторить выполнение пп. 3, 4 с временем моделирования  $Time Range = 2m/NN$  и занести получившиеся графики в отчёт. Найти по графику амплитуды и частоты первых 10 отличных от нуля гармоник (например, используя курсорный режим). Результаты занести в таблицу.

№ гармоники	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Частота, кГц										
Амплитуда, В										

10. Построить схему (Рис. 7.7) для исследования спектра периодических сигналов (добавить в предыдущую схему интегрирующую RC-цепь).

11. Запустить анализ переходных процессов *Transient* и задать время моделирования, равное  $2 \text{ мс}/NN$ . Минимальный шаг расчёта задать  $1 \text{ мкс}/NN$ .

В первом графическом окне задать вывод следующих графиков:

- зависимости заданного сигнала  $V(V1)$  от времени  $t$ ;

- зависимость напряжения  $V(Out)$  от времени  $t$ ;

Во *втором* графическом окне задать вывод следующих графиков:

- спектра исходного сигнала (зависимости величины гармоник  $HARM(V(V1))$  от частоты  $f$ ).
- спектра сглаженного сигнала (зависимости величины гармоник  $HARM(V(Out))$  от частоты  $f$ ).

12. Занести получившиеся графики в отчёт. Объяснить причину изменения спектрального состава сигнала при прохождении через интегрирующую  $RC$ -цепь.

13. Вернуться к схеме (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) и удалить интегрирующую  $RC$ -цепь.

14. В источнике  $V1$  задать в качестве сигнала периодическую последовательность симметричных трапецеидальных импульсов. Амплитуда импульсов – 5 В, длительность импульса  $0.8m/NN$ , период  $2m/NN$ , длительность фронта и среза  $200\mu/NN$ . Для этого в поле *Value* окна задания параметров этого источника можно задать  $DC\ 0\ AC\ 1\ 0\ Pulse\ -\ 5\ 5\ 0\ 200\mu/NN\ 200\mu/NN\ 0.8m/NN\ 2m/NN$  (можно скопировать из этого файла).

15. Провести анализ *Transient* с временем моделирования равным  $2мс/NN$ . Занести получившиеся графики в отчёт. Найти по графику амплитуды и частоты первых 5 гармоник (например, используя курсорный режим). Результаты занести в таблицу.

№ гармоники	1	3	5	7	9
Частота, кГц					
Амплитуда, В					

16. В источнике  $V1$  задать периодическую последовательность симметричных треугольных импульсов. Амплитуда импульсов – 5 В, длительность фронта и среза  $1\ m/NN$ . Для этого в поле *Value* окна задания параметров этого источника можно задать  $DC\ 0\ AC\ 1\ 0\ Pulse\ -\ 5\ 5\ 0\ 1m/NN\ 1m/NN\ 0\ 2m/NN$  (можно скопировать из этого файла).

17. Провести анализ *Transient* с временем моделирования равным  $2мс/NN$ . Занести получившиеся графики в отчёт. Найти по графику амплитуды и частоты первых 3-х гармоник (например, используя курсорный режим). Результаты занести в таблицу.

№ гармоники	1	3	5
Частота, кГц			
Амплитуда, В			

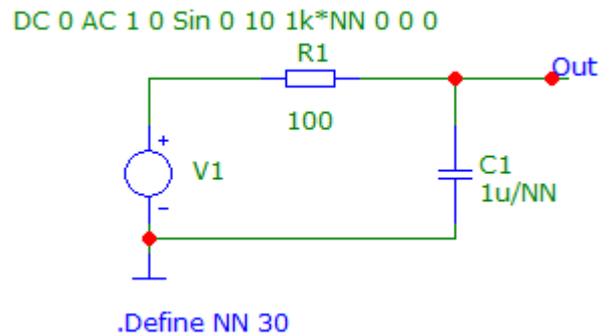


Рис. 7.7 - Схема для сравнения спектров прямоугольного и сглаженного сигналов

### 7.3 Контрольные вопросы

- 1) Какой спектр имеют непериодические сигналы?
- 2) Какой математический аппарат используется для вычисления спектральных характеристик непериодических сигналов?
- 3) Какой спектр имеют периодические сигналы?
- 4) Какой математический аппарат используется для вычисления спектральных характеристик периодических сигналов?
- 5) Что представляет собой нулевая гармоника разложения периодического сигнала в ряд Фурье?
- 6) Какой интервал считается периодом исследуемого сигнала при проведении спектрального анализа с помощью программы Micro-Cap (без проведения дополнительных настроек)?
- 7) Какая частота считается фундаментальной частотой (частотой основной гармоники) исследуемого сигнала при проведении спектрального анализа с помощью программы Micro-Cap (без проведения дополнительных настроек)?
- 8) Как приблизить исследуемый сигнал к непериодическому при исследовании спектров с помощью программы Micro-Cap?
- 9) Что такое  $\delta$ -функция (импульсная функция, функция Дирака). Какой она имеет спектр? Как его определить?
- 10) Что представляет собой ступенчатая функция  $h(t)$ ? Какой она имеет спектр? Как его определить?
- 11) Как, зная спектр сигнала, определить его постоянную составляющую?

## 8 Параметры спектрального анализа в программе Micro-Cap

### 8.1 Цели и задачи занятия:

- приобретение навыков использования Фурье-анализа в среде программы Micro-Cap;
- приобретение навыков проведения спектрального анализа видеоимпульсов с большой скважностью.
- приобретение навыков проведения спектрального анализа радиоимпульсов с большой скважностью.

## 8.2 Практические задания

### 8.2.1 Построение спектральной диаграммы импульса с большой скважностью<sup>1</sup> (видеоимпульса)

1. Построить схему для формирования импульсного сигнала (Рис. 8.2). Источник *V1* – *Voltage Source*, вкладка *Pulse* (формирование импульсов).

2. Задать параметры источника для формирования импульсов следующей формы: амплитуда 10В, задержка 0, время фронта 1 нс, время среза 1 нс, длительность импульса 1 мкс, период 10 мкс (Рис. 8.1).

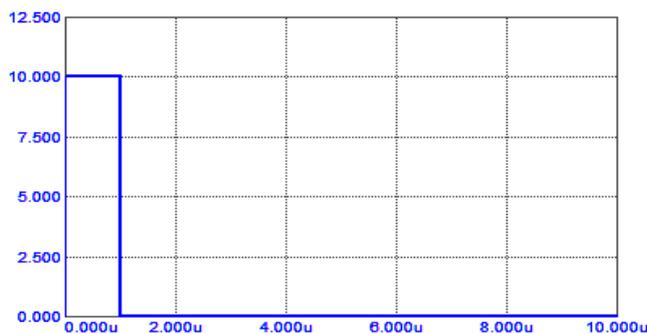
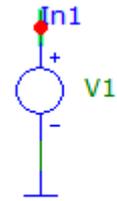


Рис. 8.1 - Прямоугольный импульс со скважностью 10



.Define NN 30

Рис. 8.2 - Схема формирования импульсного сигнала

3. Запустить анализ переходных процессов *Transient*. Время расчёта – один период сигнала. Максимальный шаг расчёта 1 нс. В разных графических окнах задать вывод следующих графиков:

- зависимость заданного сигнала  $V(In1)$  от времени  $t$  для 1 периода сигнала;
- спектр исследуемого сигнала (зависимость величины гармоник  $HARM(V(In1))$  от частоты  $f$ ).

4. Для настройки вывода спектральной диаграммы необходимо щёлкнуть левой клавишей мыши по полю графика и в появившемся окне настройки графиков зайти во вкладку *Fourier*. В этом окне (Рис. 8.3) необходимо установить число точек 8192 и число гармоник, для которых производится автомасштабирование, равным 100. Следует включить в операцию автомасштабирования и постоянную составляющую, поставив галочку в позиции *Include DC Harmonic*.

<sup>1</sup> **Скважность** - отношение периода следования (повторения) импульсов к длительности импульса.

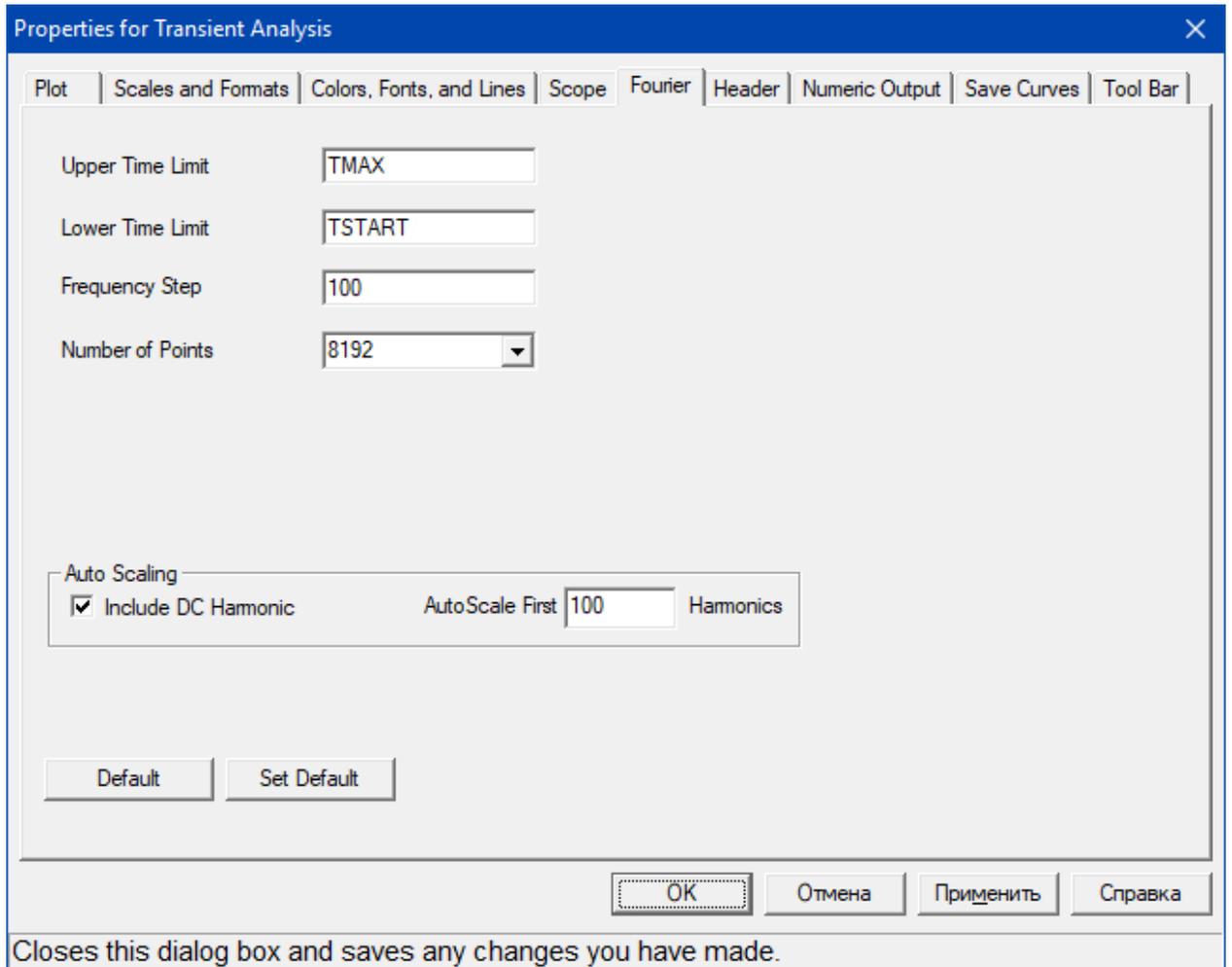


Рис. 8.3 - Установка параметров Фурье-анализа

5. Получить графики  $V(In1)$  и  $HARM(V(In1))$ . Показать результат преподавателю. Какую форму имеет огибающая амплитуд спектральных составляющих?

6. Установить в источнике  $V1$  длительность импульса 200 нс. Получить графики напряжения  $V(In1)$  и спектральную диаграмму  $HARM(V(In1))$ . Показать преподавателю. Как изменилась спектральная диаграмма при уменьшении длительности импульса?

### 8.2.2 Построение спектральной диаграммы модулированного импульса с большой скважностью (радиоимпульса)

1. Построить схему (Рис. 8.4) для формирования импульсного модулированного сигнала (радиоимпульса).

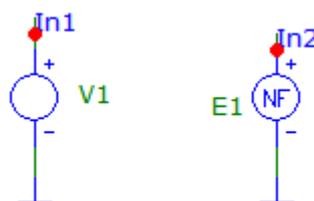


Рис. 8.4 - Схема формирования модулированного сигнала

Источник  $V1$  — *Voltage Source*, вкладка *Pulse* (формирование импульсов). Его параметры точно такие же, как в п. 1 предыдущего подраздела.

Источник  $E1$  — функциональный источник NFV. В нем задана функция формирования выходного синусоидального напряжения частотой 10 МГц, амплитуда которого определяется напряжением источника  $V1$ :  $V(In1) * \sin(2 * Pi * 10Meg * t)$  (Рис. 8.5).

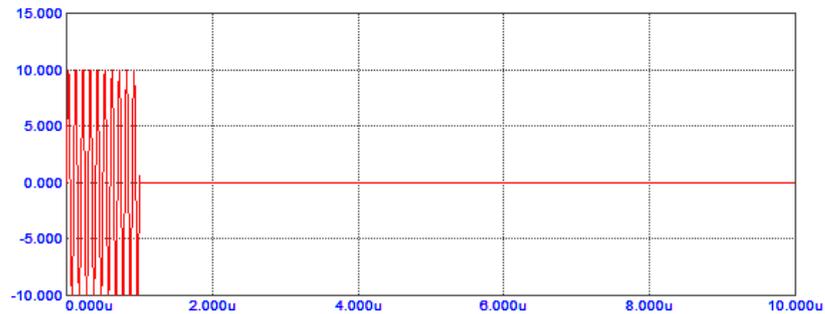


Рис. 8.5 - Радиоимпульс

2. Запустить анализ переходных процессов *Transient*. Время расчёта — один период прямоугольной огибающей сигнала. Максимальный шаг расчёта 1 нс. В разных графических окнах задать вывод следующих графиков:

- Зависимость заданного сигнала  $V(In2)$  от времени  $t$  для 1 периода сигнала;
- Спектр исследуемого сигнала (зависимость величины гармоники  $HARM(V(In2))$  от частоты  $f$ ).

3. Для настройки вывода спектральной диаграммы необходимо щёлкнуть левой клавишей мыши по полю графика и в появившемся окне настройки графиков зайти во вкладку FFT (Рис. 8.6).

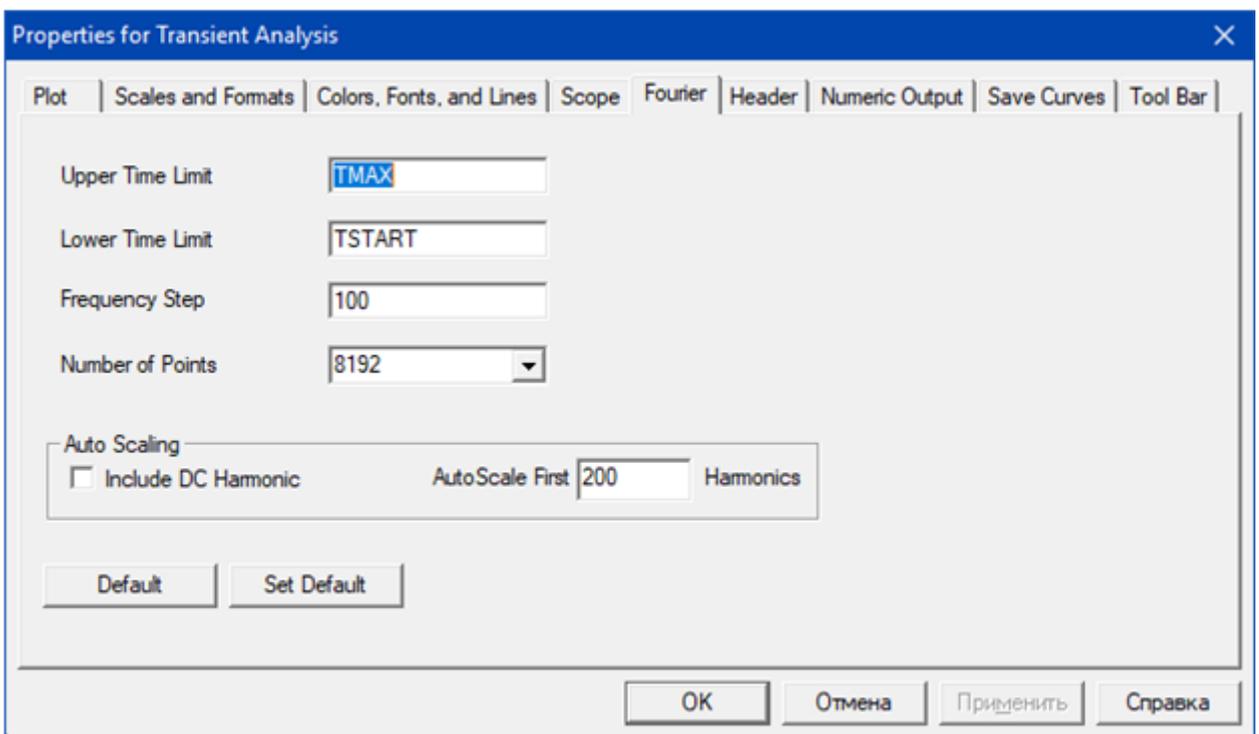


Рис. 8.6 - Установки FFT для частотного анализа радиоимпульса

В этом окне необходимо установить число гармоник, для которых производится автоматическое масштабирование, равным 200.

4. Получить графики  $V(In2)$  и  $HARM(V(In2))$ . Показать результат преподавателю. Какую форму имеет огибающая амплитуд спектральных составляющих?

5. Установить в источнике  $V1$  длительность импульса 200 нс. Получить графики напряжения  $V(In1)$  и спектральную диаграмму  $HARM(V(In1))$ . Показать преподавателю. Как изменилась спектральная диаграмма при уменьшении длительности импульса?

### 8.3 Контрольные вопросы

- 1) Что представляет собой нулевая гармоника разложения периодического сигнала в ряд Фурье?
- 2) Какой интервал считается периодом исследуемого сигнала при проведении спектрального анализа с помощью программы Micro-Cap (без проведения дополнительных настроек)?
- 3) Какая частота считается фундаментальной частотой (частотой основной гармоники) исследуемого сигнала при проведении спектрального анализа с помощью программы Micro-Cap (без проведения дополнительных настроек)?
- 4) Как приблизить исследуемый сигнал к непериодическому при исследовании спектров с помощью программы Micro-Cap?
- 5) Что такое амплитудно-частотный спектр? Привести пример графика амплитудно-частотного спектра.
- 6) Что такое фазочастотный спектр? Привести пример графика фазочастотного спектра.
- 7) Как определить фазочастотный спектр сигнала с помощью программы Micro-Cap?
- 8) Приведите пример графиков линейчатого (дискретного) и непрерывного амплитудно-частотных спектров.
- 9) Нарисуйте примерный вид графика амплитудно-частотного спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов.
- 10) Что представляет собой огибающая амплитудно-частотного спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов?
- 11) Что представляет собой огибающая амплитудно-частотного спектра периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов?
- 12) На какой частоте амплитудно-частотный спектр периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов имеет максимум?

## 9 Исследование вольтамперной характеристики диода

### 9.1 Цели и задачи занятия:

- изучение основных свойств модели полупроводникового диода в Micro-CAP по его вольтамперным характеристикам;
- исследование вольтамперных характеристик диода в зависимости от напряжения;

– исследование вольтамперных характеристик диода в зависимости от температуры.

## 9.2 Модель полупроводникового диода в Micro-Cap

Полупроводниковым диодом называют двухэлектродный прибор с одним электронно-дырочным  $p$ - $n$ -переходом. На практике наиболее распространены две группы диодов: выпрямительные и импульсные. *Выпрямительные диоды* применяются для выпрямления переменного тока, *импульсные* – в схемах электронных устройств, работающих в импульсных режимах.

Важнейшим свойством  $p$ - $n$ -перехода является способность изменять своё сопротивление в зависимости от полярности напряжения внешнего источника. Причём разница сопротивлений при прямом и обратном направлениях тока через переход может быть настолько велика, что в ряде случаев, например для силовых диодов, можно считать, что ток протекает через диод только в одном направлении - прямом, а в обратном направлении ток настолько мал, что им можно пренебречь. Прямое направление - это когда электрическое поле внешнего источника направлено навстречу электрическому полю  $p$ - $n$ -перехода, а обратное - когда направления этих электрических полей совпадают.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) идеализированного  $p$ - $n$ -перехода описывается известным уравнением Эберса-Молла:

$$I = I_0(e^{\frac{qU}{kT}} - 1)$$

где  $I_0$  – ток насыщения, тепловой или обратный ток  $p$ - $n$ -перехода:  $q$  - заряд электрона ( $q = 1.60217662 \cdot 10^{-19}$  Кулона);  $k$  - постоянная Больцмана ( $k = 1,38064852 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  - температура в градусах Кельвина.

На Рис. 9.1 изображена вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода.

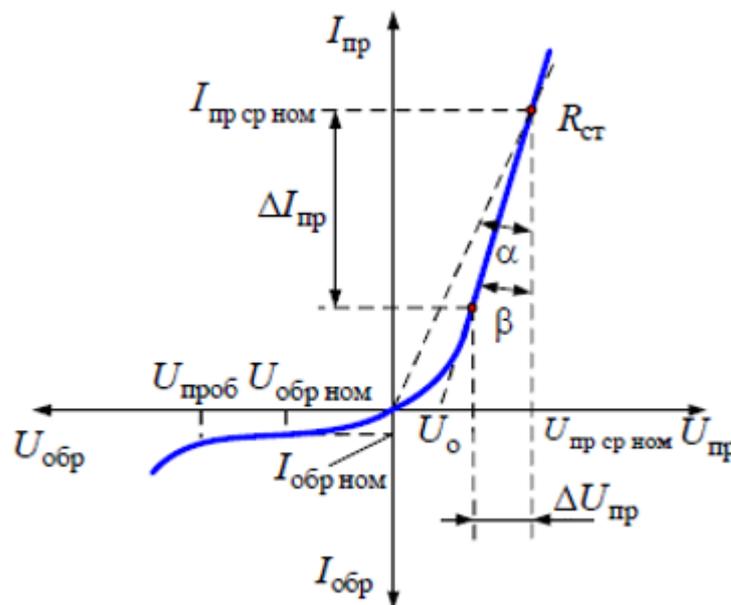


Рис. 9.1 - Вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода

Вольтамперная характеристика имеет явно выраженную нелинейность. Очевидно, что сопротивления диода зависят от положения рабочей точки на ВАХ. По вольтамперной характеристике выпрямительного диода (см. Рис. 9.1) можно определить следующие основные параметры, влияющие на его работу:

1. *Номинальный средний прямой ток*  $I_{\text{пр ср ном}}$  – среднее значение тока, проходящего через открытый диод и обеспечивающего допустимый его нагрев при номинальных условиях охлаждения.

2. *Номинальное среднее прямое напряжение*  $U_{\text{пр ср ном}}$  – среднее значение прямого напряжения на диоде при протекании номинального среднего прямого тока. Этот параметр является очень важным для обеспечения параллельной работы нескольких диодов в одной электрической цепи.

3. *Напряжение отсечки*  $U_0$ , определяемое точкой пересечения линейного участка прямой ветви вольт-амперной характеристики с осью напряжений.

4. *Пробивное напряжение*  $U_{\text{проб}}$  – обратное напряжение на диоде, соответствующее началу участка пробоя на вольт-амперной характеристике, когда она претерпевает излом в сторону резкого увеличения обратного тока.

5. *Номинальное обратное напряжение*  $U_{\text{обр ном}}$  – рабочее обратное напряжение на диоде; его значение для отечественных приборов составляет  $0,5 \cdot U_{\text{проб}}$ . Этот параметр используется для обеспечения последовательного включения нескольких диодов в одну электрическую цепь.

6. *Номинальное значение обратного тока*  $I_{\text{обр ном}}$  – величина обратного тока диода при приложении к нему номинального обратного напряжения.

*Статическое сопротивление диода (его сопротивление постоянному току):*

$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $I_{\text{пр}}$  – величина прямого тока диода;  $U_{\text{пр}}$  – падение напряжения на диоде при протекании тока  $I_{\text{пр}}$ .

Важную роль в рассмотрении процессов в цепях, содержащих диод играет также *динамическое (дифференциальное) сопротивление*  $R_{\text{дин}}$ :

$$R_{\text{дин}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} = \operatorname{tg} \beta,$$

где  $\Delta I_{\text{пр}}$  – приращение прямого тока диода;  $\Delta U_{\text{пр}}$  – приращение падения напряжения на диоде при изменении его тока  $\Delta I_{\text{пр}}$ .

Эквивалентная схема модели диода в Micro-Cap (SPICE-модель) изображена на

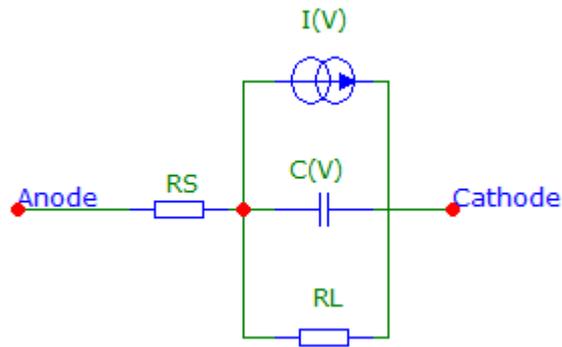


Рис. 9.2 - Эквивалентная схема модели диода в Micro-Cap:

$I(V)$  – вольтамперная характеристика «идеального диода» ( $p$ - $n$  перехода);

$C(V)$  – зависимость полной ёмкости диода (при прямых и обратных смещениях);

$RS$  – объёмное сопротивление диода;

$RL$  – сопротивление утечки перехода.

Таблица 9.1 содержит перечень параметров модели полупроводникового диода.

Таблица 9.1 - Параметры модели полупроводникового диода [2]

Имя параметра	Параметр	Значение по умолчанию	Единица измерения
IS	Ток насыщения при номинальной температуре (тепловой диффузионный ток)	$10^{-14}$	А
RS	Объёмное сопротивление базы	0	Ом
N	Коэффициент неидеальности тока насыщения	1	-
ISR	Тепловой ток рекомбинации	0	А
NR	Коэффициент неидеальности тока рекомбинации	2	-
IKF	Ток перегиба ВАХ при высокой инжекции	¥	А
TT	Время переноса (пролёта) заряда	0	С
CJO	Барьерная ёмкость $p$ - $n$ перехода при нулевом смещении	0	Ф
VJ	Контактная разность потенциалов (высота потенциального барьера)	1	В
M	Коэффициенты аппроксимации зависимости барьерной ёмкости от напряжения на $p$ - $n$ переходе	0,5	-
FC		0,5	-
EG	Ширина запрещённой зоны полупроводника	1,11	эВ
BV	Напряжение обратного пробоя (положительная величина)	¥	В

Имя параметра	Параметр	Значение по умолчанию	Единица измерения
<b>IBV</b>	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)	10-10	A
<b>NBV</b>	Коэффициент неидеальности тока пробоя	1	-
<b>IBVL</b>	Начальный ток пробоя низкого уровня	0	A
<b>NBVL</b>	Коэффициент неидеальности тока пробоя низкого уровня	1	-
<b>XTI</b>	Температурный коэффициент IS	3	-
<b>TIKF</b>	Температурный коэффициент IKF	0	°C <sup>-1</sup>
<b>TBV1</b>	Линейный температурный коэффициент BV	0	°C <sup>-1</sup>
<b>TBV2</b>	Квадратичный температурный коэффициент BV	0	°C <sup>-2</sup>
<b>TRS1</b>	Линейный температурный коэффициент RS	0	°C <sup>-1</sup>
<b>TRS2</b>	Квадратичный температурный коэффициент RS	0	°C <sup>-2</sup>
<b>KF</b>	Коэффициент фликкер-шума	0	-
<b>AF</b>	Показатель степени в формуле фликкер-шума	1	-
<b>T_MEASURD5</b>	Температура измерения	0	°C
<b>T_ABS5)</b>	Абсолютная локальная температура	0	°C
<b>T_REL_GLOBAL</b>	Разность локальной и текущей температур	0	°C
<b>T_REL_LOCAL</b>	Разность температур моделируемого диода и диода-прототипа	0	°C

## 9.3 Практические задания

### 9.3.1 Исследование вольтамперных характеристик диода в зависимости от напряжения

1. Запустить приложение Micro-Cap. В новом проекте создать схему, приведённую на Рис. 9.3. Марка диода выбирается по номера варианта (Таблица 9.2).

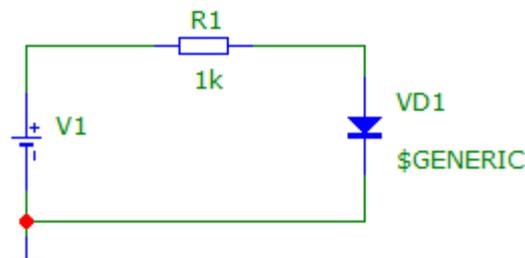


Рис. 9.3 - Схема для исследования вольтамперных характеристик диодов.

Для примера выбран тип диода по умолчанию \$GENERIC

Таблица 9.2 - Выбор диода для исследования

№ варианта	Марка диода	№ варианта	Марка диода
1.	1N752	2.	D74S
3.	1N914	4.	D74SCLMP
5.	1N3491	6.	DBREAK
7.	1N3879	8.	DBREAKCL
9.	1N3889	10.	DBREAKPFC
11.	1N3399	12.	DBREAKZ
13.	1N3900	14.	MBR845
15.	1N3909	16.	MBR20100
17.	1N4001	18.	MBR20100CT
19.	1N4143	20.	MBRA210ET3
21.	1N4729	22.	MBRF2060CT
23.	1N4737	24.	MBRP30045CT
25.	1N4742	26.	MR500
27.	1N4933	28.	MR502
29.	1N4934	30.	MR510
31.	1N4935	32.	MR750
33.	1N4936	34.	MR810
35.	1N4937	36.	MR814
37.	1N5391	38.	MR818
39.	1N5399	40.	MR820
41.	D74	42.	MR2401
43.	D74CLMP	44.	MR2508

2. Для исследования вольтамперной характеристики необходимо запустить режим анализа по постоянному току (пункт меню *Analysis* ⇒ *DC Analysis* или *Alt + 3*).

В появившемся диалоговом окне *DC Analysis Limits* (Рис. 9.4) необходимо выполнить следующие установки:

- поля *Variable2* и *Range* ничего вносить не нужно, так как они используются только когда в схеме несколько источников постоянного напряжения. Поле *Method* должно содержать значение NONE;
- в поле *Range* строки *Variable 1* (диапазон напряжений источника 1) ввести «10,0,0.3» - это означает конечное напряжение источника 10 В, начальное напряжение источника 0 В, шаг исследования 0,3 В;
- в поле *Variable 1 Name* необходимо указать название самого источника напряжения *V1*, так как согласно Рис. 9.3 единственным источником является батарея *V1*;
- в поле *Temperature* ввести стандартную температуру окружающей среды 27°C, при которой снимаются характеристики всех компонентов;
- включить флажок *Auto Scale Ranges* (Автоматический выбор масштаба), что позволит наилучшим образом отобразить график;
- поле *Run Options* должно содержать значение *Normal*;
- в поле *X Expression* (Выражение по оси абсцисс) введите  $V(VD1)$  - напряжение на диоде VD1;
- в поле *Y Expression* (Выражение по оси ординат) таблицы введите  $I(VD1)$  - ток через диод VD1.

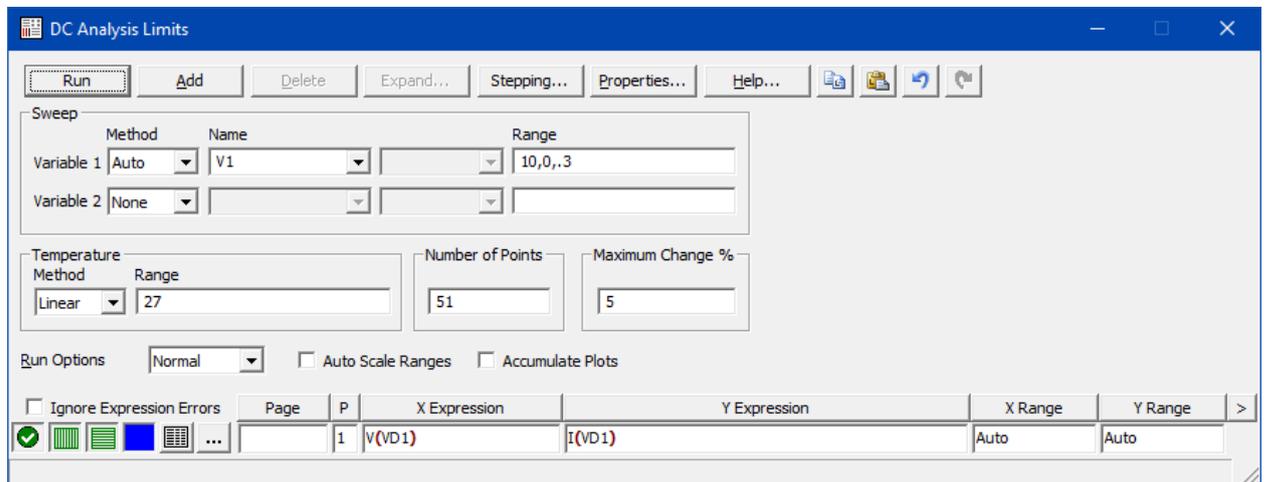


Рис. 9.4 – Настройки в диалоговом окне *DC Analysis Limits* для исследования вольтамперных характеристик диода в зависимости от напряжения

3. Запустить вычисления, нажав кнопку *Run*.

На (Рис. 9.5) представлены результаты расчёта.

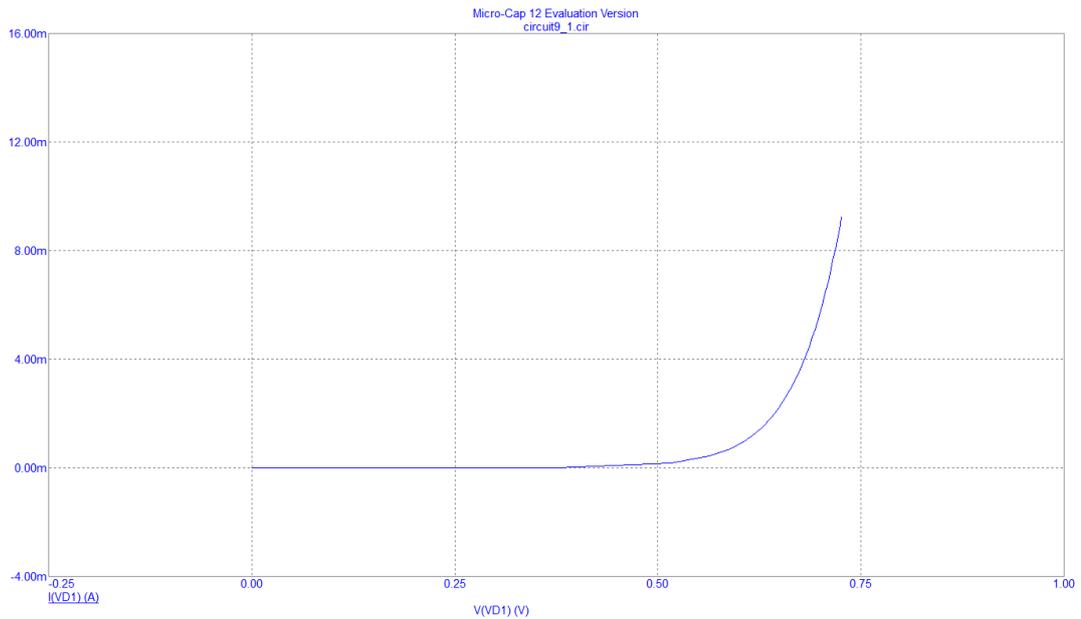


Рис. 9.5 - Вольтамперные характеристики диода в зависимости от напряжения

### 9.3.2 Исследование вольтамперных характеристик диода в зависимости от температуры

1. Построить семейство вольтамперных характеристик в зависимости от температуры. Для этого в поле *Temperature Range* указать «100,0,20» - что означает начальное значение температуры 0°C, конечное 100°C, шаг 20°C. Поле *Method* должно содержать *Linear*.

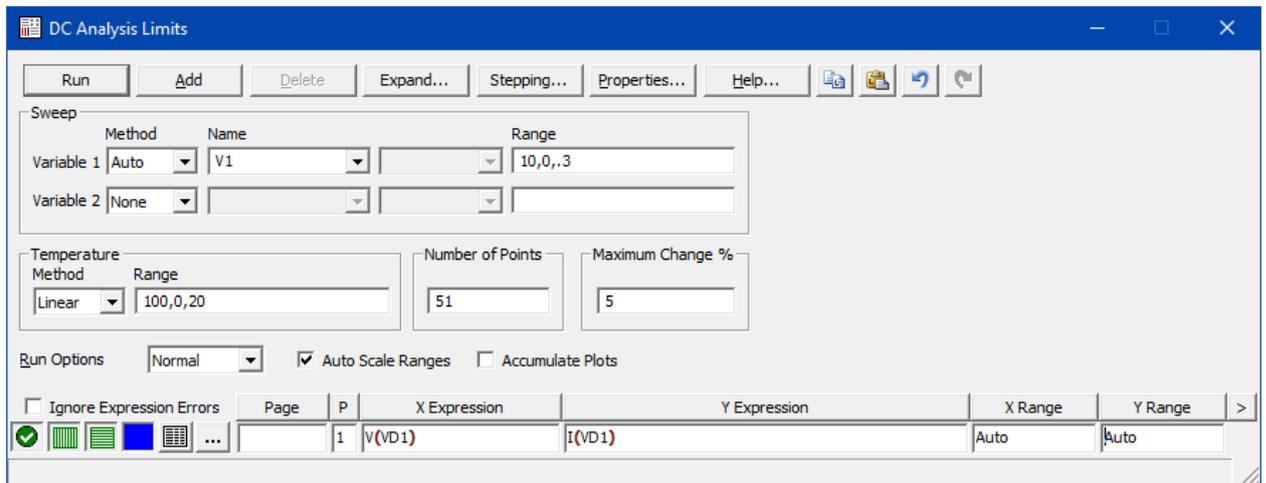


Рис. 9.6 – Настройки в диалоговом окне DC Analysis Limits для исследования вольтамперных характеристик диода в зависимости от температуры

2. На графике подписать кривые, как это сделано на **Ошибка! Источник ссылки не найден..** Для этого в режиме вывода графика нажать пункт меню *Scope* ⇒ *Label Branches...* и затем в появившемся маленьком окошке *Label Curves Branches* нажать ОК.

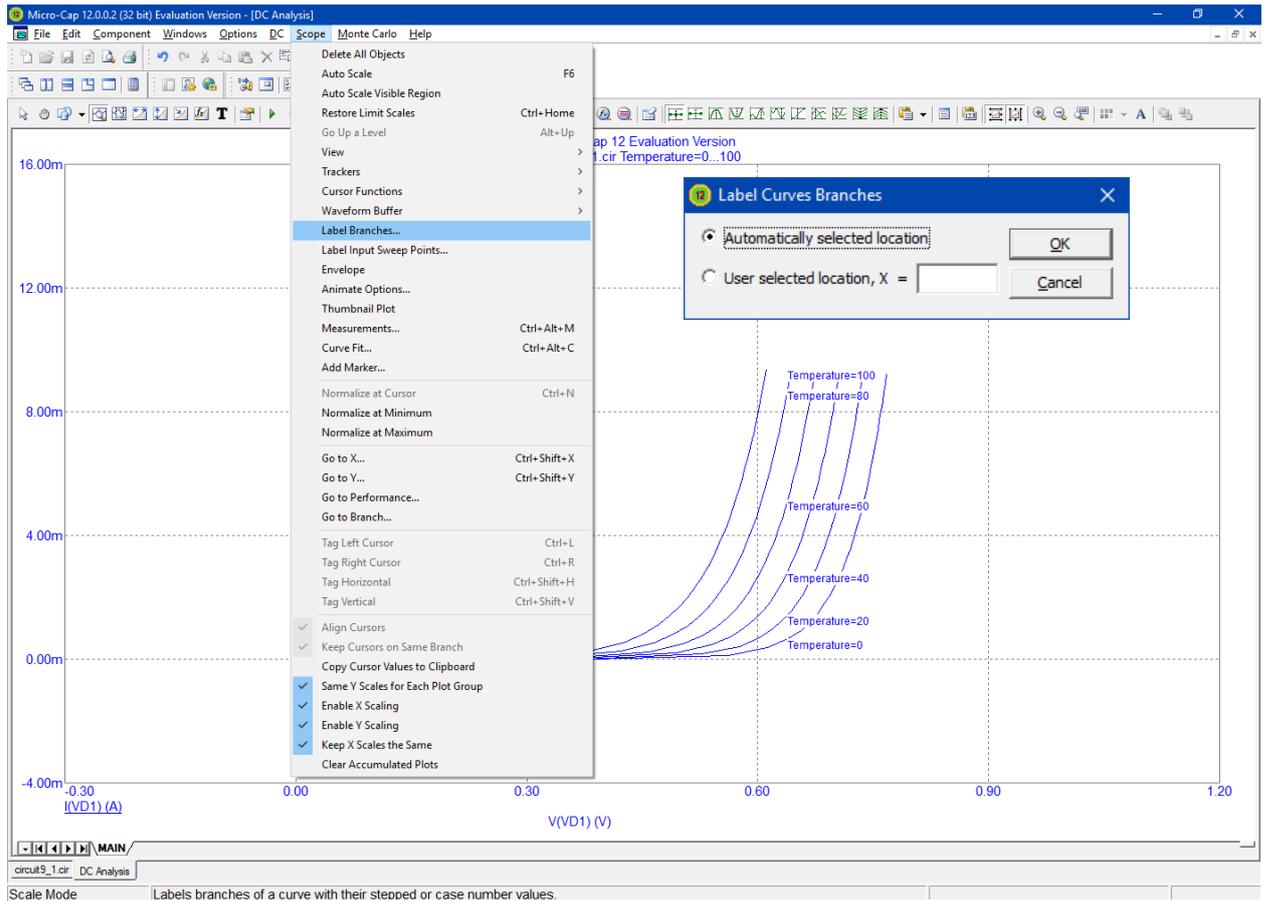


Рис. 9.7 -- Вольтамперные характеристики диода в зависимости от температуры

Полученный график сохранить в отчёте.

## 10 Список рекомендуемой литературы

1. Кобрин Ю.П. Знакомство с САПР Micro-Cap v12 Evaluation: Учебное пособие по дисциплине «Информационные технологии проектирования электронных средств» для студентов специальности «11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». [Электронный ресурс]. - Томск: ТУСУР, 2018. - 55 с.
2. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. - 617 с.
3. М.А. Амелина, С.А. Амелин. Краткий ознакомительный экскурс по программе Micro-Cap. Версии 9, 10. [Электронный ресурс] // Филиал НИУ МЭИ в г. Смоленске. Кафедра ЭИМТ. 2012. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B3u4J7t3fyZ2M2NiODczM2ItMDUxYS00Y2JhLWlwZDUtODhmNGJjNGI4N2Mx/view>
4. Разовиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. - 368 с.

5. ОС ТУСУР 01-2013 (СТО 02069326.1.01-2013). Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. - Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с.
6. Кобрин Ю.П. Применение системы автоматизации научно-технических расчетов MathCAD при проектировании РЭС : Методические указания к лабораторной работе. [Электронный ресурс] / Ю. П. Кобрин. - Томск: ТУСУР, 2012. — 53 с.
7. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов. инженеров и конструкторов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2007. - 368 с.