Министерство Науки и Высшего Образования Российской Федерации
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Методические указания к семинарам по дисциплине
«Электроника и Микропроцессорная Техника»
(для студентов 5 семестра факультета БМТ)

Семинар №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

ст. преподаватель
Трубачёв Е.А.

Кафедра РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

Москва 2024 год

ЦЕЛЬ РАБОТЫ на семинаре заключается в исследовании статических вольт-амперных характеристик модели полупроводникового диода в программе аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей Micro-Cap 12.

ЛЕЙТМОТИВ семинара состоит в знакомстве с основными функциями программы аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей Micro-Cap 12.

Перед началом выполнения работы необходимо скачать и установить программу МС12. Она распространяется без лицензии и может быть загружена по адресу yadi.sk/d/hT1wjDiVAvdXtA.

Часть 1. Построение схемы

Для получения прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода на рабочем поле Micro-Cap 12 (МС12) составляется принципиальная схема, представленная на рис.1.

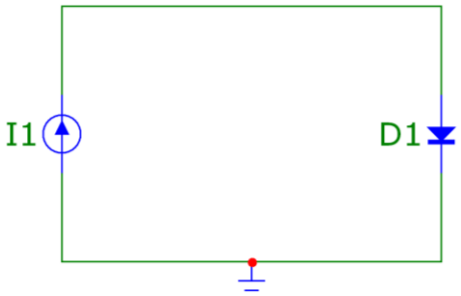

Рис. 1. Принципиальная схема для исследования прямой ветви ВАХ диода.

Шаг 1. Откройте программу МС12.

Запустите программу МС12 и ознакомьтесь с пиктограммами наиболее часто используемых элементов схем и инструментов, размещенных в верхней панели основного окна (рис. 2).

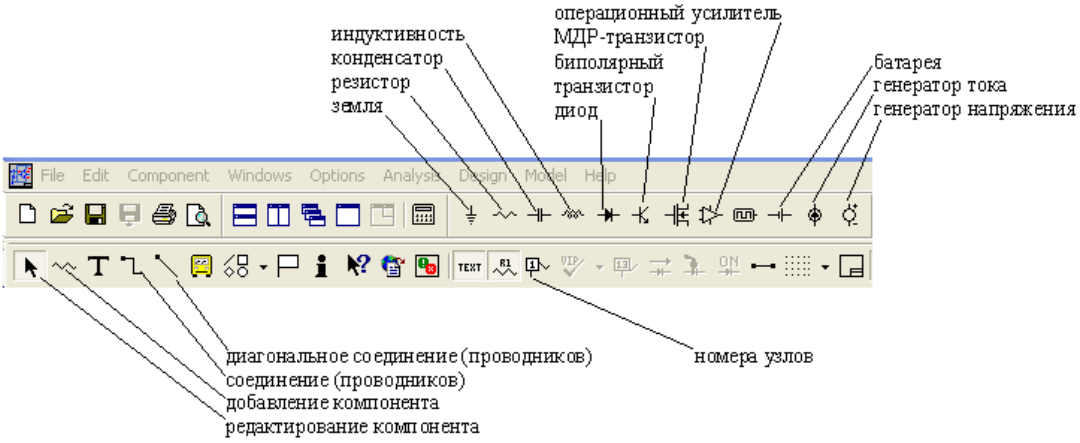

Рис. 2. Верхняя панель основного окна программы МС12.

Шаг 2. Установите на рабочем поле диод.

Левой кнопкой мыши выберите пиктограмму диода на верхней панели (горячая клавиша D). Левой кнопкой мыши поместите диод на рабочем поле. (Для поворота элемента щелкните правой кнопкой мыши при зажатой левой, либо нажмите на знак стрелочки рядом с пиктограммой диода.)

Шаг 3. Выберите модель диода.

При помещении диода на рабочее поле открывается окно Diode (рис. 3).

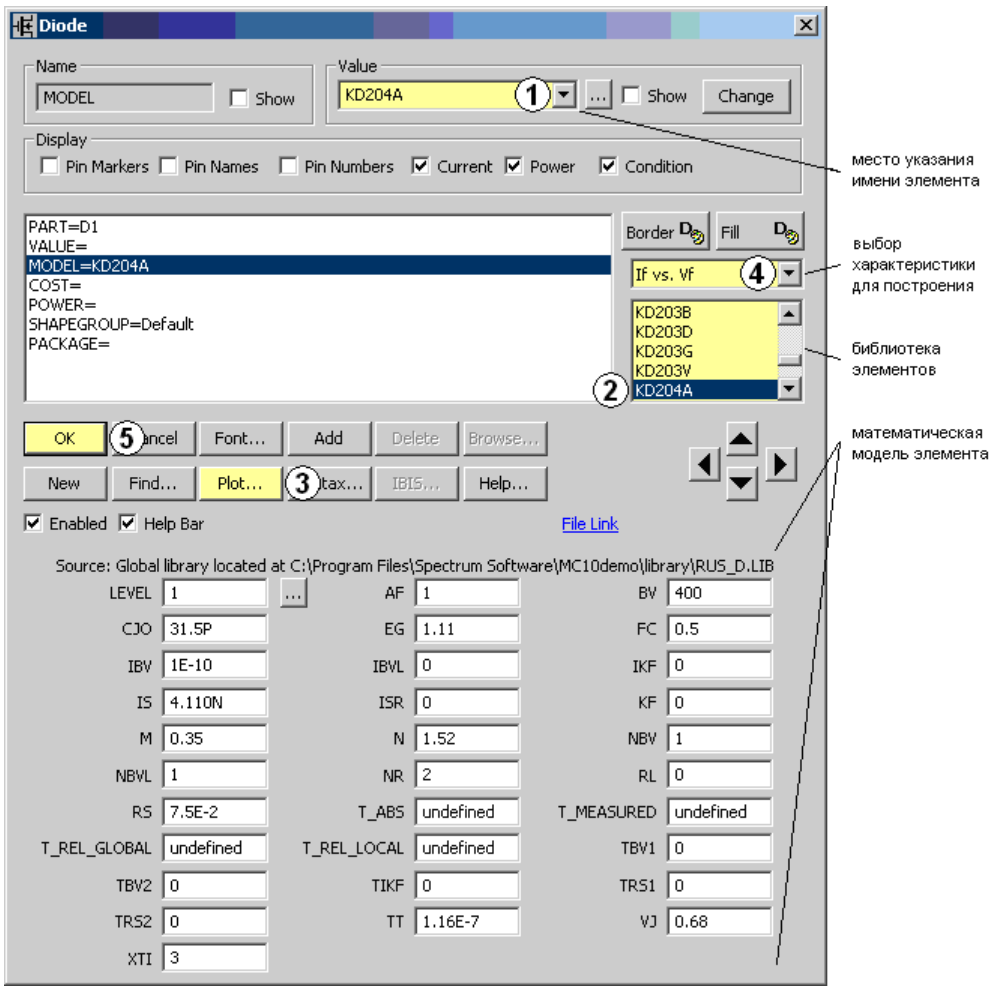

Рис. 3. Окно Diode для диода КД204А.

Для выбора модели диода в поле Value **(рис. 3, п. 1)** окна Diode введите имя модели, принятое в МС12. (Выберите индивидуальную модель диода в соответствии с вашим вариантом в электронном университете (или в журнале группы) согласно таблице 1.)

Таблица 1. Варианты моделей диода.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Модель диода	KD202P	KD208A	KD203A	KD202J	KD213A	KD212B

Номер варианта	7	8	9	10	11	12
Модель диода	KD521A	KD202M	KD212A	KD906A	KD204B	KD102B

Номер варианта	13	14	15	16	17	18
Модель диода	KD510A	KD203V	KD203D	KD106A	KD105B	KD104A

Номер варианта	19	20	21	22	23	24
Модель диода	KD103A	KD213V	KD202V	KD203G	KD213B	KD209A

Номер варианта	25	26	27	28	29	30
Модель диода	KD202K	KD102A	KD203B	KD220A	KD202D	KD213G

Выберите модель диода в поле списка имеющихся в библиотеке диодов **(рис. 3, п. 2)**. (Параметры математической модели диода будут представлены в нижней части окна Diode.)

Шаг 4. Постройте прямую ветвь ВАХ выбранной модели диода.
В окне Diode нажмите на кнопку Plot… **(рис. 3, п. 3)**.

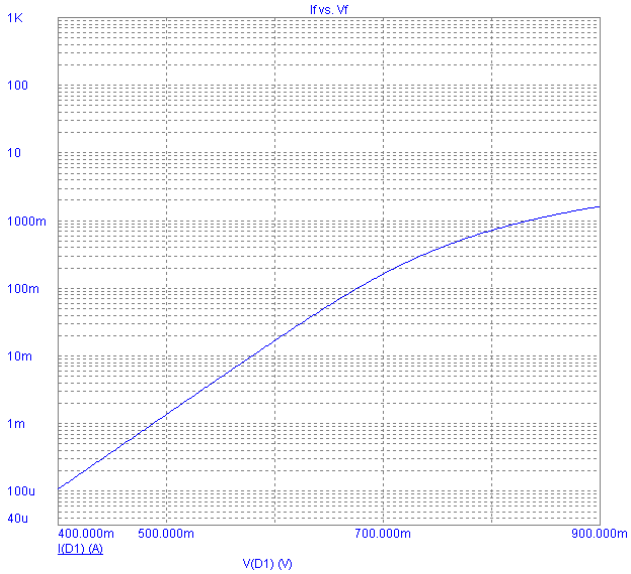

Рис. 4. Прямая ветвь ВАХ диода КД204А.

Появившееся изображение прямой ветви ВАХ (рис. 4) по умолчанию выводится в полулогарифмическом масштабе. Для перехода к привычному линейному масштабу необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на графике, в появившемся окне Properties for перейти во вкладку Scales and Formats и выполнить последовательность действий:

– снимите галочку в поле Log в области Y **(рис. 5, п. 1)**,
– нажмите кнопку Применить **(рис. 5, п. 2)**,
– нажмите кнопку Auto Scale в области Y **(рис. 5, п. 3)**,
– нажмите кнопку OK **(рис. 5, п. 4)**.

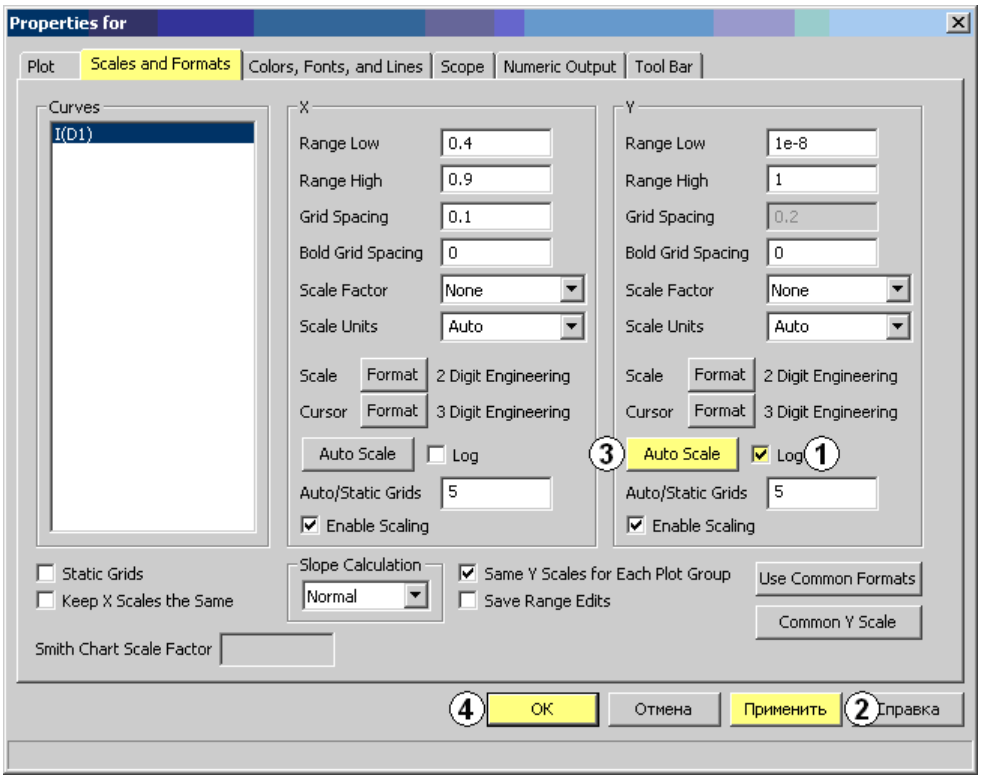

Рис 5. Окно Properties for.

Шаг 5. Постройте обратную ветвь ВАХ выбранной модели диода.

В списке характеристик диода **(рис. 3, п. 4)** окна Diode выберите пункт Ir vs. Vr и нажмите на кнопку Plot… **(рис. 3, п. 3)**.

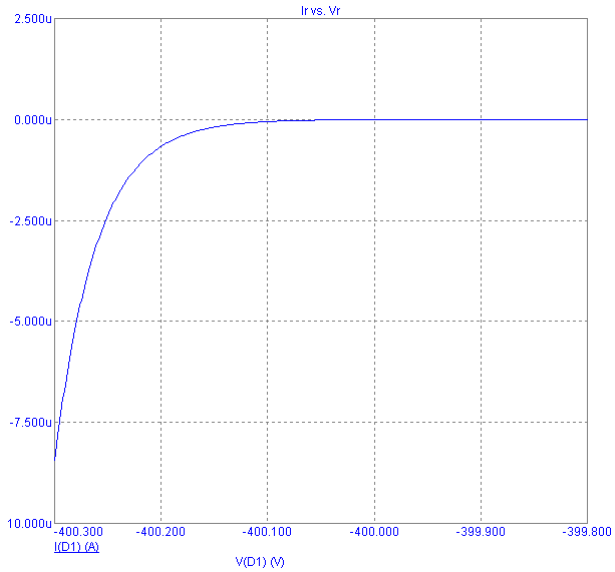

Рис. 6. Обратная ветвь ВАХ диода КД204А.

По появившемуся изображению обратной ветви ВАХ (рис. 6) можно оценить, что обратное напряжение пробоя для диода КД204А составляет 400 В. Это значение соответствует справочным данным: в нижней половине окна Diode (рис. 3) приведена математическая модель (или SPICE-модель) диода, которая используется при анализе работы элемента и схемы. Параметр, приведенный в поле BV, расшифровывается как «Reverse breakdown “knee” voltage» (при наведении на параметр в нижней части окна указывается его расшифровка в английской терминологии) или «Обратное напряжение пробоя» в отечественной терминологии.

Для окончательного размещения диода КД204А на рабочем поле программы МС12 нажмите кнопку OK **(рис. 3, п. 5)** окна Diode.

Шаг 6. Установите на рабочем поле источник тока.

Пиктограмма источника тока выглядит как (горячая клавиша I). (Перед размещением источника тока убедитесь, что его ориентация соответствует прямому включению диода (рис. 7).)

Рис. 7. Взаимная ориентация диода и источника тока при прямом включении.

Шаг 7. Настройте режим работы источника тока.

В появившемся окне Current Source (рис. 8) по умолчанию настроен импульсный режим работы. Переключите источник тока в режим постоянного тока, выбрав вкладку None в нижней части окна **(рис. 8, п. 1)**.

Задайте амплитуду постоянного тока 300 мА. Используйте обозначения, принятые в программе МС12 (см. таблицу 2). Для этого в поле DC **(рис. 8, п. 2)** окна Current Source введите значение 300m (единицы измерения не указываются, пробел между значением и буквой не ставится, разделителем целой и дробной части является точка (не запятая!), также обратите внимание, что программа МС12 не чувствительна к регистру). Нажмите кнопку OK **(рис. 8, п. 3)**.

Таблица 2. Обозначения в МС12, соответствующие различным десятичным множителям.

Десятичный множитель	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{3}	10^{6}	10^{9}
Приставка в СИ	пико-	нано-	микро-	милли-	кило-	мега-	гига-
Обозначение в СИ	п	н	мк	м	к	М	Г
Обозначение в МС12	p	n	u	m	k	meg	g

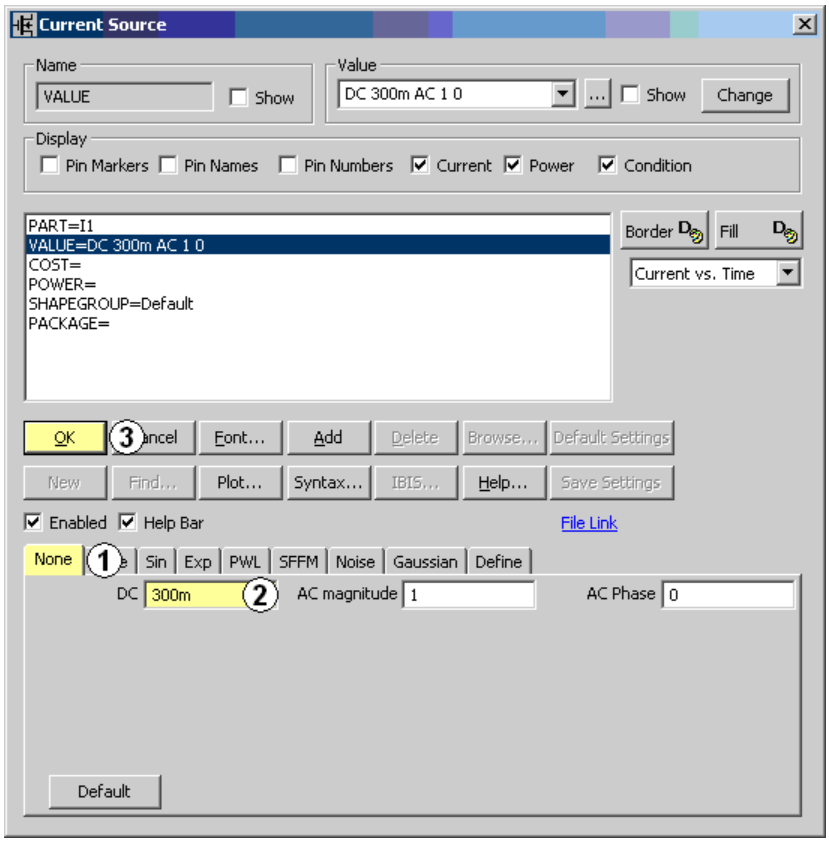

Рис. 8. Окно Current Source для источника тока в режиме постоянного тока.

Шаг 8. Соедините элементы с помощью проводника.

Пиктограмма проводника выглядит как (горячее сочетание клавиш Ctrl + W). Выбрав проводник, переместите курсор к «верхнему» выводу источника тока, зажмите левую кнопку мыши, переместите курсор к «верхнему» выводу диода, отпустите левую кнопку мыши. После чего аналогично соедините «нижние» выводы диода и источника тока. (Рекомендуется соединять элементы в четыре этапа, как показано на рис. 9.)

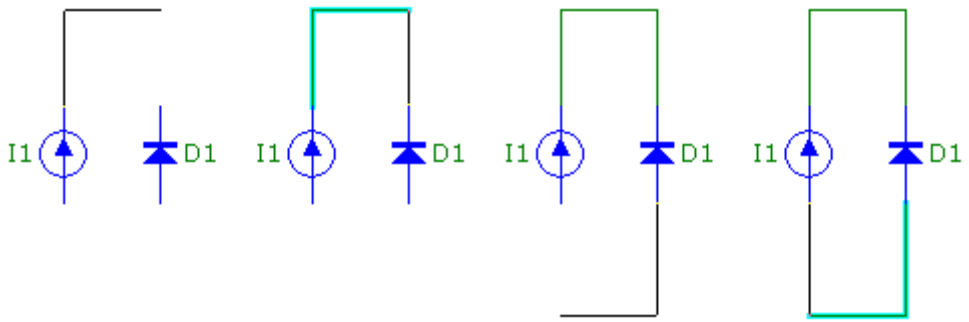

Рис. 9. Соединение элементов с помощью проводника.

Шаг 9. Заземлите принципиальную схему (задайте нулевой потенциал).

Пиктограмма земли выглядит как (горячая клавиша G). Установите землю на «нижний» провод. Земля в данном случае обозначает на принципиальной схеме нулевой потенциал и

необходима для корректных математических расчетов при моделировании работы схемы в программе MC12.

Полученная принципиальная схема (рис. 10) позволит исследовать прямую ветвь ВАХ.

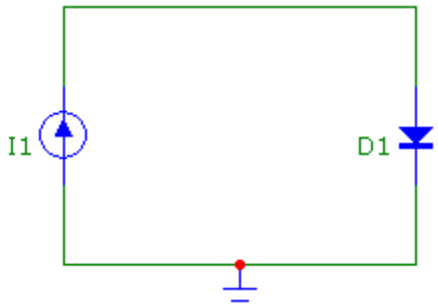

Рис. 10. Принципиальная схема для исследования прямой ветви ВАХ диода.

Составленную принципиальную схему сохраните с помощью меню File → Save As… в папке «Семинар 1» на Рабочем столе в формате *.CIR. (Название выберите произвольно.)

Часть 2. Анализ прямой ветви ВАХ диода

Для анализа схемы перейдите во вкладку Analysis верхнего меню MC12 (рис. 11).

Наиболее часто применяются следующие виды анализа:

– Transient… анализ переходных процессов,
– AC… анализ частотных характеристик,
– DC… анализ передаточных характеристик по постоянному току,
– Dynamic DC… анализ динамических процессов по постоянному току.

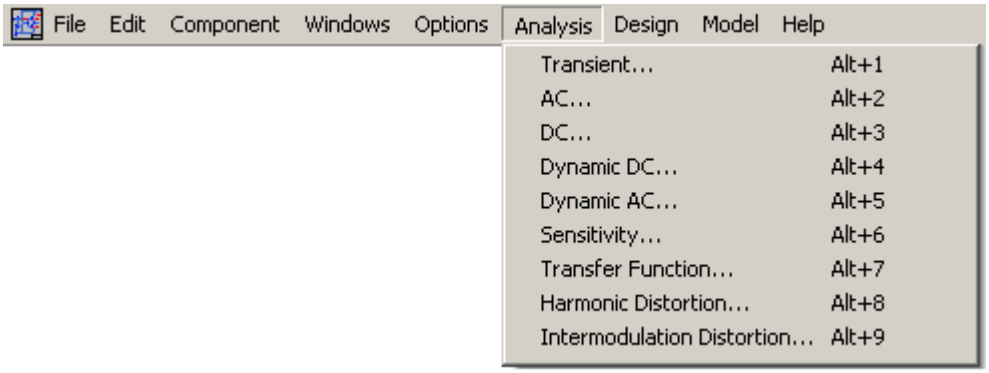

Рис. 11. Виды анализа в MC12.

Шаг 10. Проведите анализ Dynamic DC….

Перейдите в меню Analysis → Dynamic DC… для запуска анализа.

Правильность составления схемы можно оценить по результатам анализа.

Для получения наиболее полной картины о протекающих в схеме процессах включите в появившемся окне Dynamic DC Limits (рис. 12) отображение следующих параметров:

– номера узлов,
– напряжение в узлах,
– токи в ветвях,
– рассеиваемые мощности,
– состояние элементов.

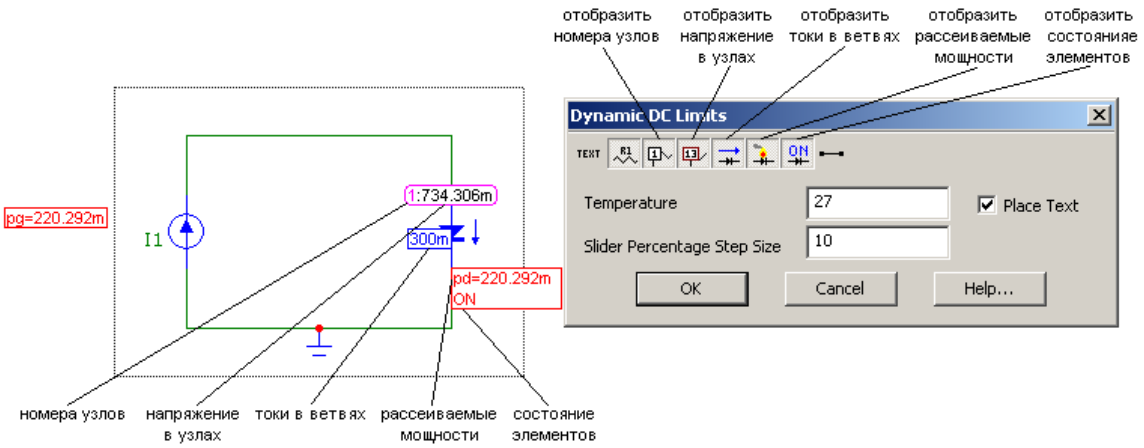

Рис. 12. Окно Dynamic DC Limits и отображение параметров на схеме при прямом включении.

На каждом компьютере анализируется работа индивидуальной модели диода, поэтому численные результаты получаются различными. Однако при слишком большом расхождении с методическими указаниями рекомендуется проверить схему на наличие ошибок.

Наиболее частые ошибки при составлении схемы:

– отсутствие заземления,

– разрывы в проводнике,

– короткие замыкания.

(Последняя ошибка обнаруживается по отсутствию на «верхней» части схемы схеме номера узла и напряжения. Вероятно, выводы одного из элементов накоротко замкнуты. Чтобы устранить эту ошибку, нужно удалить проводник, скрытый «под» элементами, выделив его с помощью инструмента Select Mode с пиктограммой курсора (горячее сочетание клавиш Ctrl + E).)

В графе «Состояния элементов» можно обнаружить значение ON. В зависимости от входных параметров это значение может быть различным. Основные состояния полупроводниковых элементов с обозначениями в MC12 приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные состояния полупроводниковых элементов.

Обозначение	ON	OFF	ZENER	LIN	SAT	HOT
Состояние	Прибор открыт	Прибор закрыт	Электрический пробой	Линейный режим	Режим насыщения	Перегрев прибора

<u>Задание на самостоятельную проработку в аудитории.</u>

Изменяя амплитуду тока на генераторе, получите состояния OFF и HOT на диоде.

Перейдите в меню Dynamic DC → Exit Analysis для выхода из анализа.

Шаг 11. Проведите анализ DC….

Перейдите в меню Analysis → DC… для запуска анализа.

Появившееся окно DC Analysis Limits (рис. 13) разделено на несколько частей:

– в области Sweep выбираются ИЗМЕ**Н**ЯЕМЫЕ параметры,

– в области Temperature регулируется температура окружающей среды,

– в нижней части окна указываются ИЗМЕ**Р**ЯЕМЫЕ параметры (графическое отображение).

Для снятия прямой ветви ВАХ в реальных условиях оператору эксперимента необходимо было бы изме**н**ять силу тока на источнике тока I1 (см. рис. 10). Для каждого установленного значения силы тока в качестве изме**р**яемых параметров определялась бы сила тока, протекающего через диод, и падение напряжения на диоде. Силу тока можно измерить с помощью

последовательно установленного амперметра, а падение напряжения – с помощью параллельно установленного вольтметра (однако для упрощения работы в программе MC12 измерительные устройства не устанавливаются на схеме). Зависимость показаний амперметра от показаний вольтметра для каждого значения силы тока на источнике тока и будет результатом эксперимента – прямой ветвью ВАХ исследуемого диода.

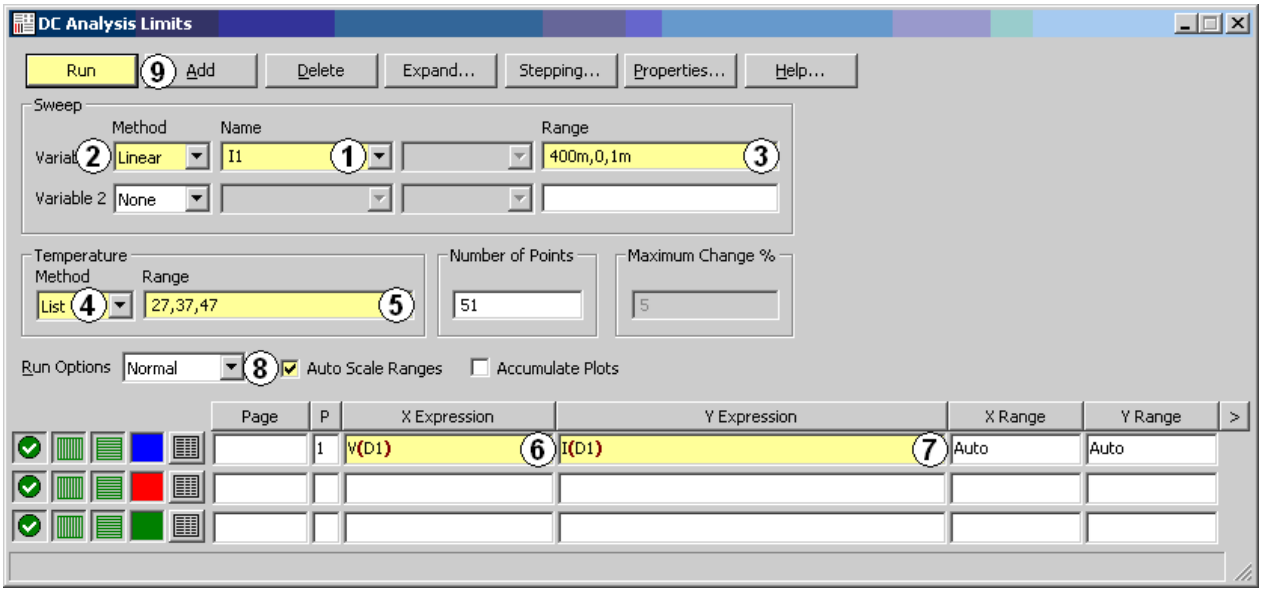

Рис. 13. Окно DC Analysis Limits для исследования прямой ветви ВАХ диода.

Для повторения такого эксперимента в программе MC12 сначала необходимо задаться изменяемым параметром в области Sweep. Для этого в поле Name выберите название источника тока I1 **(рис. 13, п. 1)**. Единственным параметром источника тока в режиме постоянного тока является сила тока, поэтому поле правее поля Name неактивно. При выборе более сложных устройств в этом поле появится возможность выбора изменяемого параметра.

Далее в поле Method выберите пункт Linear **(рис. 13, п. 2)**. Таким образом все значения силы тока можно будет задать как линейное изменение параметра от минимального до максимального значения с выбранным шагом. Для этого в поле Range введите следующую запись: 400m, 0, 1m **(рис. 13, п. 3)**. Принятая в программе MC12 форма обозначения диапазона выглядит так: максимальное значение, минимальное значение, шаг изменения. Значения разделяются запятыми (и опционально пробелами).

Для анализа влияния температуры окружающей среды на прямую ветвь ВАХ полупроводникового диода можно провести построение при нескольких значениях температуры. Для этого в области Temperature в поле Method выберите пункт List **(рис. 13, п. 4)**. Это позволит задать значения температуры не в виде диапазона с пределами и шагом, а в виде последовательности значений любого размера. После этого в поле Range введите следующую запись: 27, 37, 47 **(рис. 13, п. 5)**. Теперь при построении будет отображаться три графика прямой ветви ВАХ полупроводникового диода для трех значений температуры окружающей среды.

Последним пунктом при проведении эксперимента будет определение измеряемых параметров и их графическое отображение. Для этого среди нижних трех строк (каждая строка соответствует отдельной графической зависимости) в первой строке в поле X Expression введите следующую запись: V(D1) **(рис. 13, п. 6)**. Это означает, что по оси абсцисс графической зависимости будет откладываться напряжение, падающее на диоде, обозначенном как D1 (см. рис. 10). Аналогично в поле Y Expression введите запись: I(D1) **(рис. 13, п. 7)**. По оси ординат будет откладываться сила тока, протекающего через диод. При таком расположении осей результатом построения будет график прямой ветви ВАХ диода D1 (см. рис. 14).

Для автоматического выбора наиболее подходящего под полученную графическую зависимость масштаба поставьте галочку в поле Auto Scale Ranges **(рис. 13, п. 8)**. Для запуска анализа нажмите кнопку Run **(рис. 13, п. 9)**.

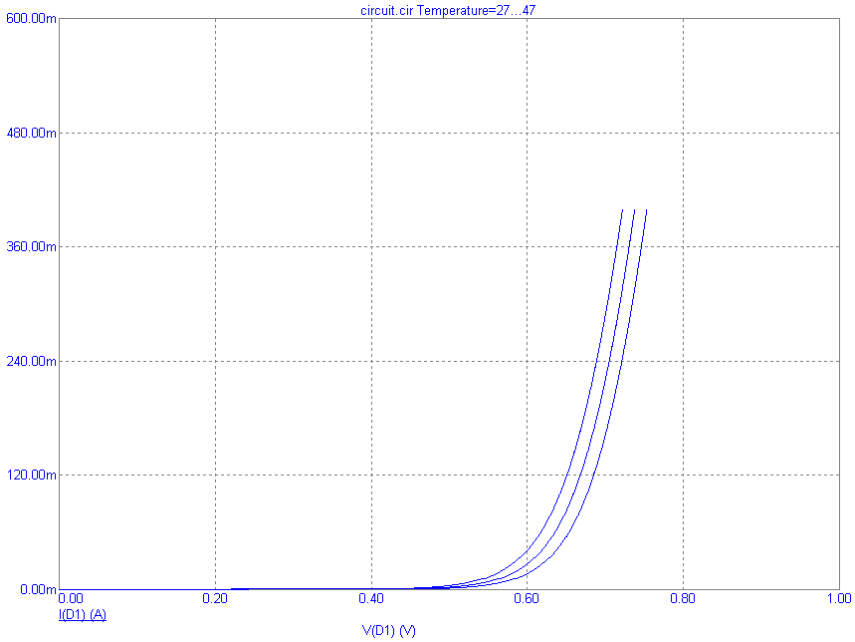

Рис. 14. Прямая ветвь ВАХ диода КД204А для трех значений температуры.

Шаг 12. Добавьте информативности на полученный график.

Результатом анализа стали три прямые ветви ВАХ диода для трех температур (рис. 14). Однако из полученных графических зависимостей нельзя понять, какой температуре соответствует каждая кривая. Также нельзя точно определить, насколько температура влияет на значение напряжения при том же значении силы тока. На полученные «голые» графики необходимо добавить дополнительную информацию.

Для работы с графиками можно применять инструмент Tag Mode (в дальнейшем будет использоваться обозначение «Выноски») позволяющий делать выноску со значением координат к любой точке графика. Помимо выноски к точке существуют горизонтальная выноска и вертикальная выноска, показывающие разницу по соответствующей оси между двумя произвольно выбранными точками.

Однако точность ручного выбора точки оставляет желать лучшего, поэтому чаще применяется инструмент Trackers (в дальнейшем будет использоваться обозначение «Маркеры»), который состоит из двух разновидностей: группа инструментов , позволяющая устанавливать точку на графике с конкретным значением координаты по оси абсцисс или ординат, и группа инструментов , позволяющая устанавливать маркеры на локальные и глобальные минимумы и максимумы графиков.

Помимо этого, два независимых маркера с указанием координат могут быть выставлены левой и правой кнопками мыши в произвольном месте. Для переключения между графиками можно использовать стрелки вверх и вниз на клавиатуре. Над системой координат указано, график для какого случая выделен в данный момент. Под системой координат указаны как значения координат правого и левого маркера, так и разница между значениями координат.

Еще одним вариантом добавления информативности являются инструменты Graphics и Text Mode (горячее сочетание клавиш Ctrl + T), с помощью которых можно как проводить дополнительные построения на графике, так и указывать дополнительные условия, например, можно привести конкретную температуру для конкретного графика.

Часть возможностей добавления информативности проиллюстрирована на рис. 15.

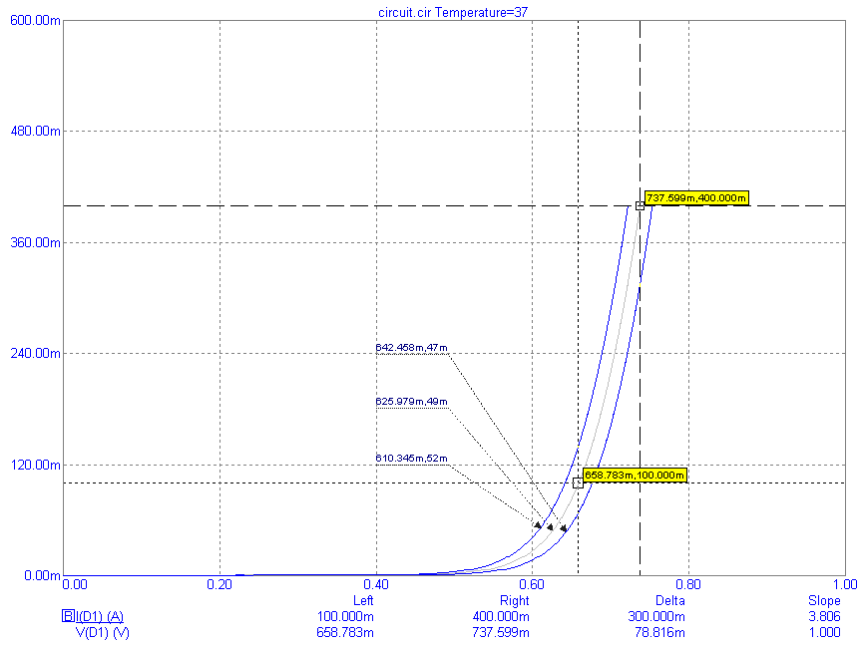

Рис. 15. Прямая ветвь ВАХ диода КД204А для трех значений температуры с отметками.

Перейдите в меню DC → Exit Analysis для выхода из анализа.

Часть 3. Анализ обратной ветви ВАХ диода

Для анализа обратной ветви ВАХ диода рекомендуется внести изменения на схему: источник тока необходимо заменить на источник постоянного напряжения (батарейку).

Шаг 13. Внесите изменения в схему.

Чтобы убрать источник тока со схемы, выберите инструмент Select Mode (горячее сочетание клавиш Ctrl + E). Выделите нужный элемент на схеме левой кнопкой мыши, вызовите контекстное меню правой кнопкой мыши и выберите пункт Delete (горячая клавиша Del).

Пиктограмма источника постоянного напряжения выглядит как (горячая клавиша B). (Перед размещением источника напряжения убедитесь, что его ориентация соответствует обратному включению (рис. 16).) В окне Battery введите значение напряжения 50 В.

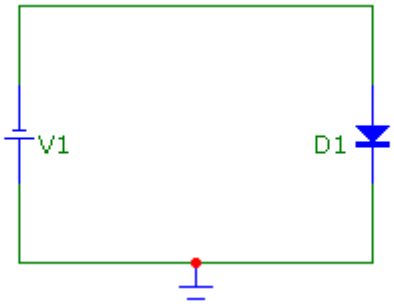

Рис. 16. Принципиальная схема для исследования обратной ветви ВАХ диода.

Шаг 14. Проведите анализ Dynamic DC….

Проведите анализ и убедитесь, что диод находится в закрытом состоянии (рис. 17).

Шаг 14. Проведите анализ DC….

Постройте обратную ветвь ВАХ диода в диапазоне обратных напряжений от 0 В до 50 В (не более напряжения пробоя!) (рис. 18, 19). (Обратите внимание, что для диода напряжения обратные, однако для источника напряжения прямые и имеют положительные значения.)

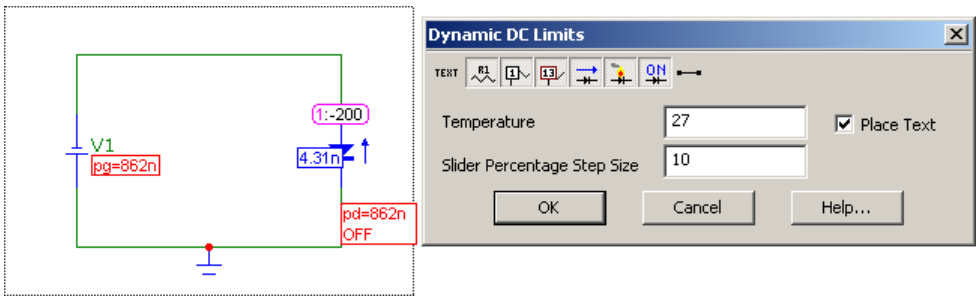

Рис. 17. Окно Dynamic DC Limits и отображение параметров на схеме при обратном включении.

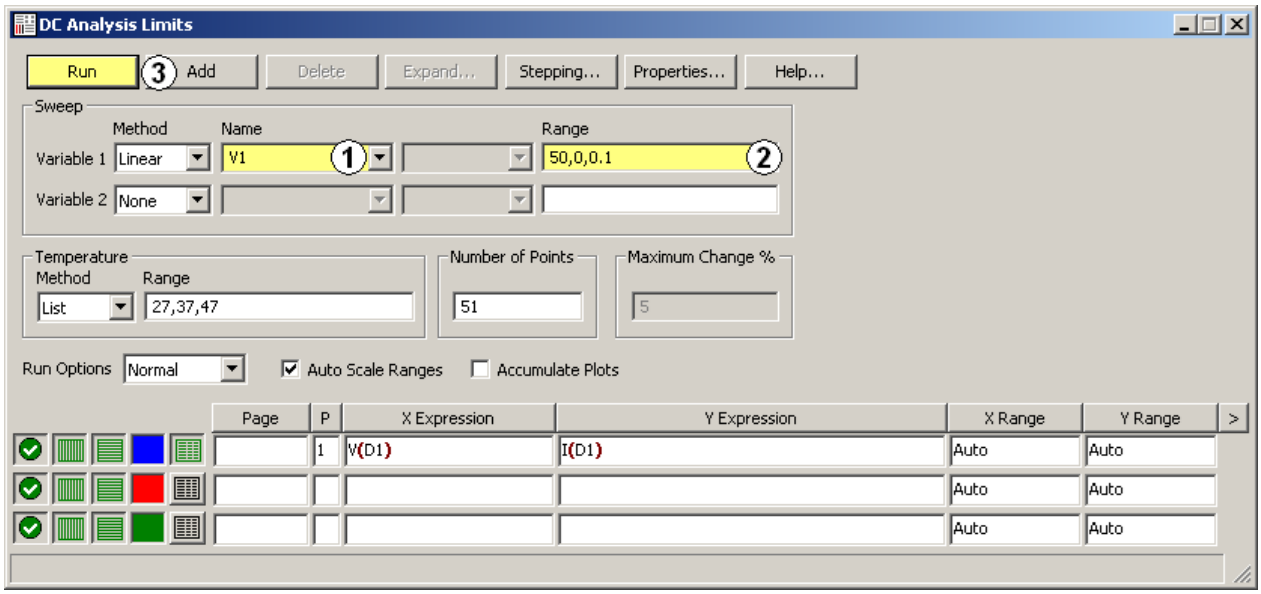

Рис. 18. Окно DC Analysis Limits для исследования обратной ветви ВАХ диода.

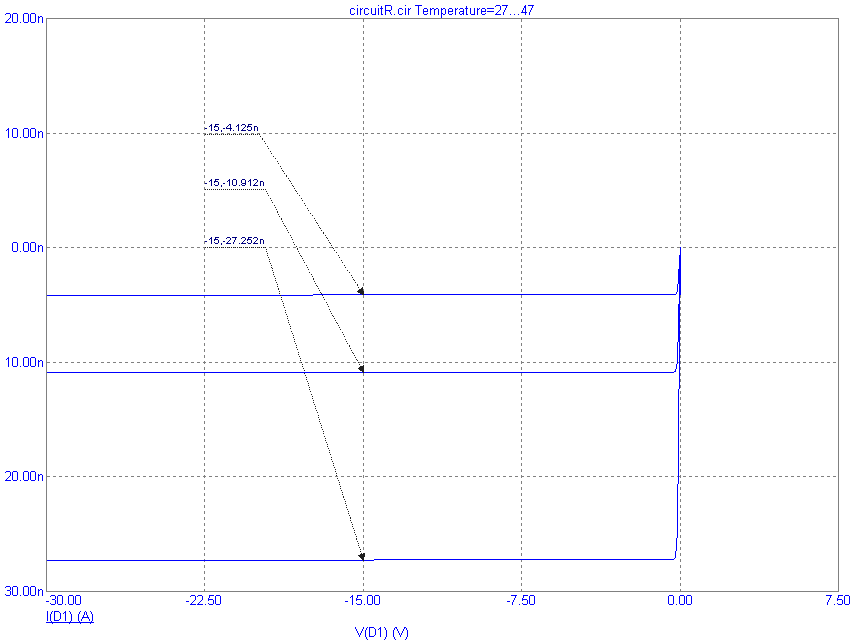

Рис. 19. Прямая ветвь ВАХ диода КД204А для трех значений температуры с отметками.

<u>Задание на самостоятельную проработку в аудитории</u>

Измените диапазон напряжений на источнике так, чтобы получить пробой на обратной ветви ВАХ. Вспомните, какой параметр в математической модели диода отвечает за напряжение пробоя.

Сохраните схему на рабочем столе в папке «Семинар 1». Выключите компьютер.