

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

Р.Ш. Загидуллин

**Лабораторный практикум
по курсу Электроника.
Полупроводниковые диоды**

Электронное учебное издание

Полупроводниковые диоды

*Методические указания к выполнению лабораторного практикума по
дисциплине «Электроника»*

Часть 1 Исследование в Microcap, лабораторные работы 1 и 2

Москва

(С) 2014 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

УДК 517.31

Рецензент:

Загидуллин Р.Ш.

Лабораторный практикум по курсу Электроника. Полупроводниковые диоды - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2016.

© 2016 МГТУ имени Н.Э. Баумана

СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, АББРЕВИАТУРЫ

ВАХ — вольтамперная характеристика;

ВФХ — вольтфарадная характеристика;

MSxx — программная среда NI Multisim 10 или 12 версии;

МСxx — программная среда Microcap версии 7, 9 или 10;

Оглавление

СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, АББРЕВИАТУРЫ	3
ЦЕЛЬ ПРАКТИКУМА:.....	6
ЭКСПЕРИМЕНТ 1	7
ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА В ПРОГРАММЕ MICROCAP	7
ЭКСПЕРИМЕНТ 2	9
ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА.....	9
ЭКСПЕРИМЕНТ 3	10
ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА	10
СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	12
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ РЕШЕНИЙ В MICROCAP	13
ВЫВОД ДАННЫХ РЕШЕНИЯ MICROCAP ВО ВНЕШНИЙ ТЕКСТОВЫЙ ФАЙЛ.....	15
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА	20
ЧТЕНИЕ ДАННЫХ ИЗ ТЕКСТОВОГО ФАЙЛА В ПРОГРАММУ MSCAD.....	18
ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ВАХ В MSCAD ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ.....	19
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ GIVEN MINERR.....	26
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ ТРЕХ ОРДИНАТ.....	23
ПОСТРОЕНИЕ ВАХ ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ НА ОДНОМ ГРАФИКЕ.....	29
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИ ДИОДА.....	32
ВКЛЮЧЕНИЕ МОДЕЛИ В БАЗУ ДАННЫХ	37
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	41
ЛИТЕРАТУРА. ОСНОВНАЯ.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержит описания лабораторных практикумов по курсу «Основы электроники». Лабораторный практикум должен выполняться на персональном компьютере пользователя с использованием технологий компьютерных измерительных приборов. Предполагается, что пользователи знакомы с теоретическими положениями, относящимися к материалу лабораторных работ.

Контрольные мероприятия – предварительный контроль и контроль при защите после проведения лабораторных работ, осуществляется на интернет ресурсе http://e-learning.bmstu.ru/portal_rk6/ - среда MOODLE. Там же находятся и тестовые задания и хранятся результаты контрольных мероприятий.

ЦЕЛЬ ПРАКТИКУМА:

Получение и исследование статических и динамических характеристик германиевого или кремниевого полупроводниковых диодов с целью определение по ним параметров модели полупроводниковых диодов, размещения моделей в базе данных программ схемотехнического анализа. Приобретение навыков в использовании базовых возможностей программ схемотехнического анализа для исследования статических и динамических характеристик полупроводниковых диодов с последующим расчётом параметров модели полупроводникового диода. Приобретение навыков в экспериментальном исследовании полупроводниковых приборов. Освоение математических программ для расчёта параметров модели полупроводниковых приборов на основе данных экспериментальных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТ 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА В ПРОГРАММЕ MICROCAP

Для заданного варианта диода провести моделирование лабораторного стенда получения ВАХ диода в программе Microcap 9 demo как на прямой ветви, так и на обратной ветви по показанным ниже схемам рис.1.

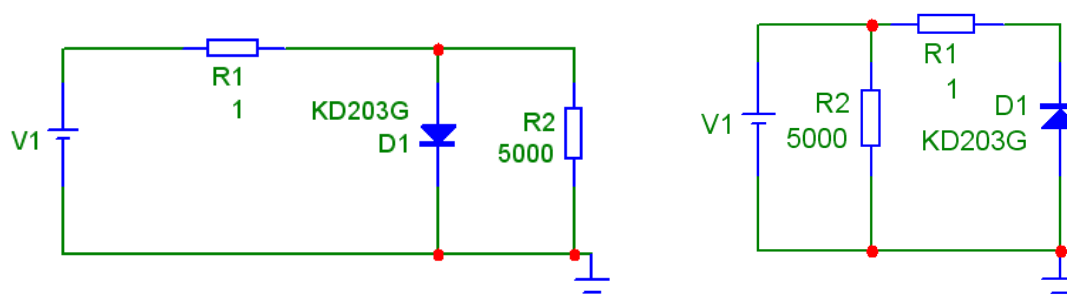


Рисунок 1 а) Измерение прямой ветви

б) Измерение обратной ветви

Примечание: Номер варианта задания определяется номером студента в списке группы и номером группы:

- для группы 1 номер варианта задания (номер диода в файле библиотеки **Rusd.Lib**) совпадает с номером студента в списке группы (номера диодов считать самостоятельно), для группы 2 номер варианта задания (номер диода в файле библиотеки **Rusd.Lib**) определяется как (номер студента в списке группы) +16, для группы 3 номер варианта (номер диода в файле библиотеки **Rusd.Lib**) определяется как номер студента в списке группы +30. Если библиотека заканчивается, продолжение в библиотеке **SovDiod.lib**. Для группы 4 номер варианта задания определяется номером диода в библиотеке **SovDiod.lib**, для группы 5 - (номер студента в списке группы) +15, для группы 6 - (номер студента в списке группы) +25. Если библиотека заканчивается, продолжение в библиотеке **Rusd.Lib**.
- Библиотеки диодов находятся в архиве отечественных полупроводниковых приборов/Первая лабораторная работа/Модуль 1/Основы электроники ИУ-7/e-learning.bmstu.ru/rk6. Прочитать архивы можно любым текстовым редактором, скопировать свой вариант на закладку Text MCxx → CtrlC – CtrlV, при наличии

диода в окне *Text*, его название подсвечивается в окне выбора *MSxx*, чтобы его увидеть на схеме – поставить «галку» в поле *Show* того же окна. Пример настройки пределов *DC* анализа в приложении.

1. Провести эксперименты по получению *VAX* полупроводникового прибора, со значениями $R1 = 1 \text{ Ом}$, $R2 = 5000$ в режиме анализа по постоянному току.
Дать пояснения по использованию схем получения *VAX*.
2. Полученные данные *VAX* сохранить в виде текстового файла на жёстком диске в формате, пригодном для передачи данных в программу *MCAD*. Передать данные в *MCAD*, построить *VAX*.
3. В программе *MCAD* [по полученным данным экспериментальной *VAX* определить параметры модели диода](#) по постоянному току (параметры модели диода RS , IS , FtN), используя 2 метода: по 3 точкам и по 4 точкам (метод *Minerr*), на основании снятых в п.1 своих данных. Сравнить полученные данные с параметрами модели в библиотеке.
4. [Проверить совпадение *VAX*](#) рассчитанной и исходной модели (из библиотеки) на общем графике. Добиться совпадения *VAX* с точностью до 10% по току для значения напряжения на прямой ветви 1 Вольт за счёт изменения параметров вновь полученной модели.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Для заданного варианта типа диода провести экспериментальное исследование поведения диода как управляемой электрической ёмкости и по результатам исследования получить параметры барьерной ёмкости диода. В анализе использовать приведённую на рис. 2 схему с параллельным колебательным контуром.

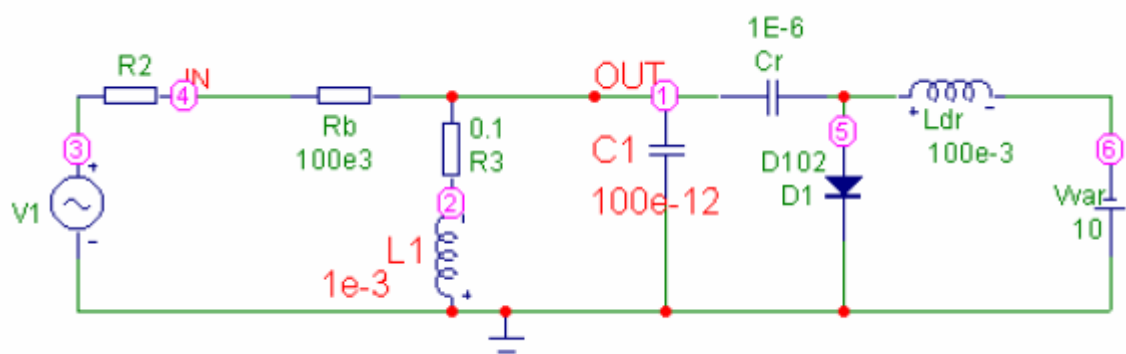


Рисунок 2

1. В программе Microcap 9 (режим анализа частотных характеристик, AC) получить резонансные характеристики колебательного контура для не менее четырёх значений напряжения смещения (источник напряжения Vvar). Определить по графикам резонансные частоты.
2. Передать данные о резонансных частотах параллельного колебательного контура при разных значениях напряжения смещения в программу MCAD. Построить там график зависимости резонансной частоты от напряжения Vvar.
3. По полученным данным построить вольтфарадную характеристики полупроводникового диода.
4. В программе MCAD, используя полученную вольтфарадную характеристику, рассчитать параметры барьерной ёмкости диода (параметры модели диода CJO, M, VJ) и сравнить с табличными значениями из задания.

ЭКСПЕРИМЕНТ 3. (ИУ-7, РК-6 НЕ КАСАЕТСЯ).

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

1. Формирование модели полупроводникового диода средствами Microcap.

Создать модель прибора через пункт меню File->New и, взяв за образец ранее описание модели диода, заменив в ней параметры, на параметры модели, вычисленные по экспериментальным данным в программе MCAD

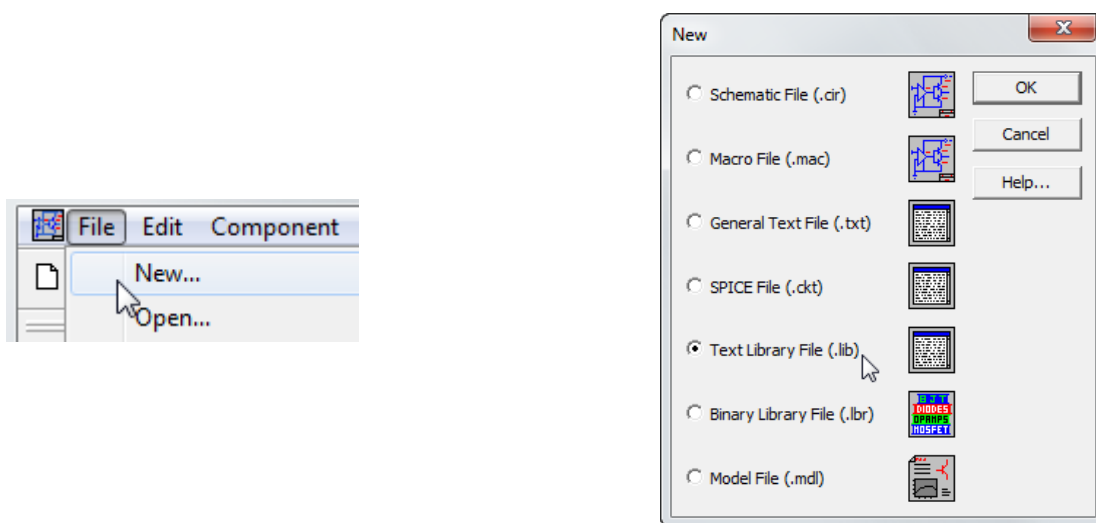


Рисунок 3

Примечание: на рисунке замещаемые параметры обозначены красным пунктиром.

2. Сохранить полученный файл модели в каталоге «с:\MC9\LIBRARY\». Имя файла оформить по правилу "ИМЯ_ФАЙЛА МОДЕЛИ_ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ.LIB"
3. [Внести в базу данных Microcap разработанную модель](#) за счёт корректировки файла NOM.LIB добавив путь до файла в конец списка:

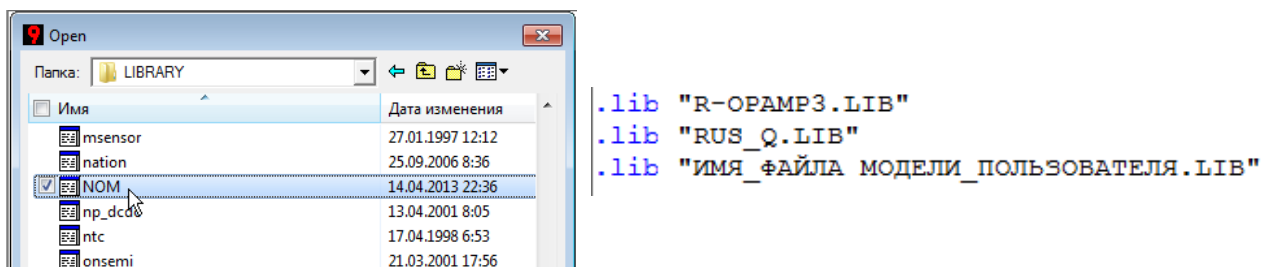


Рисунок 4

«. lib "ИМЯ_ФАЙЛА МОДЕЛИ_ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ.LIB"».

Примечание: если файл модели будет сохранен в произвольном месте диска, то к имени модели необходимо добавить путь до этого файла.

4. Построить ВАХ исходной модели (DoldModel) и модели, полученной в результате расчёта (DnewModel). Сравнить эти ВАХ (схема на рис. 5) и проверить совпадение тока диодов при напряжении на них равном 1 Вольт.

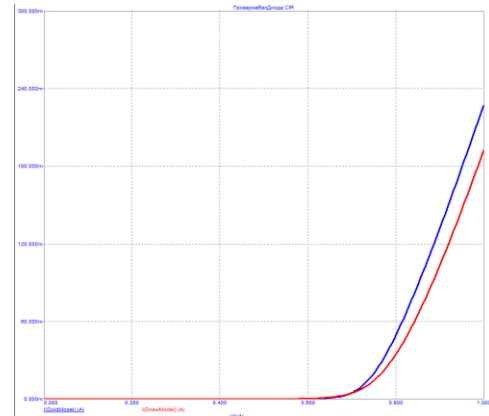
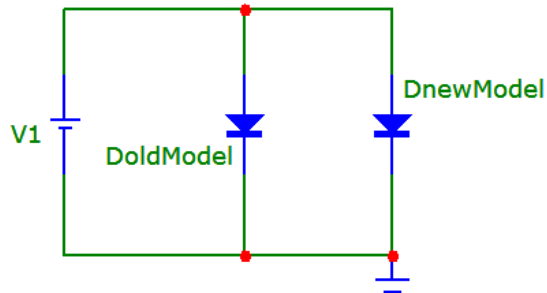


Рисунок 5

5. Адекватность модели проверить по степени совпадения расчётных данных и данных модели в библиотеке. При необходимости настроить новую модель за счёт изменения параметров I_s , R_s и N . Для оперативного изменения параметров модели можно использовать слайдер для заданного параметра, рис. 6

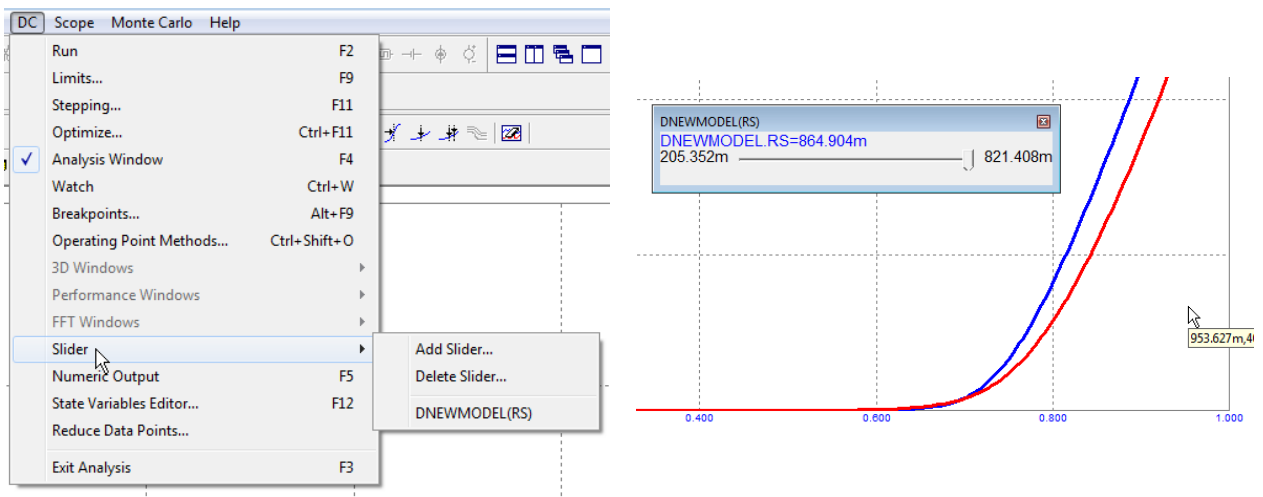


Рисунок 6

6. Оценить и объяснить полученные данные.

Приложение.

СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ РЕШЕНИЙ В MICROCAP

Місгосар позволяет строить графики с использованием формульных выражений в полях осей графика, рис 7.

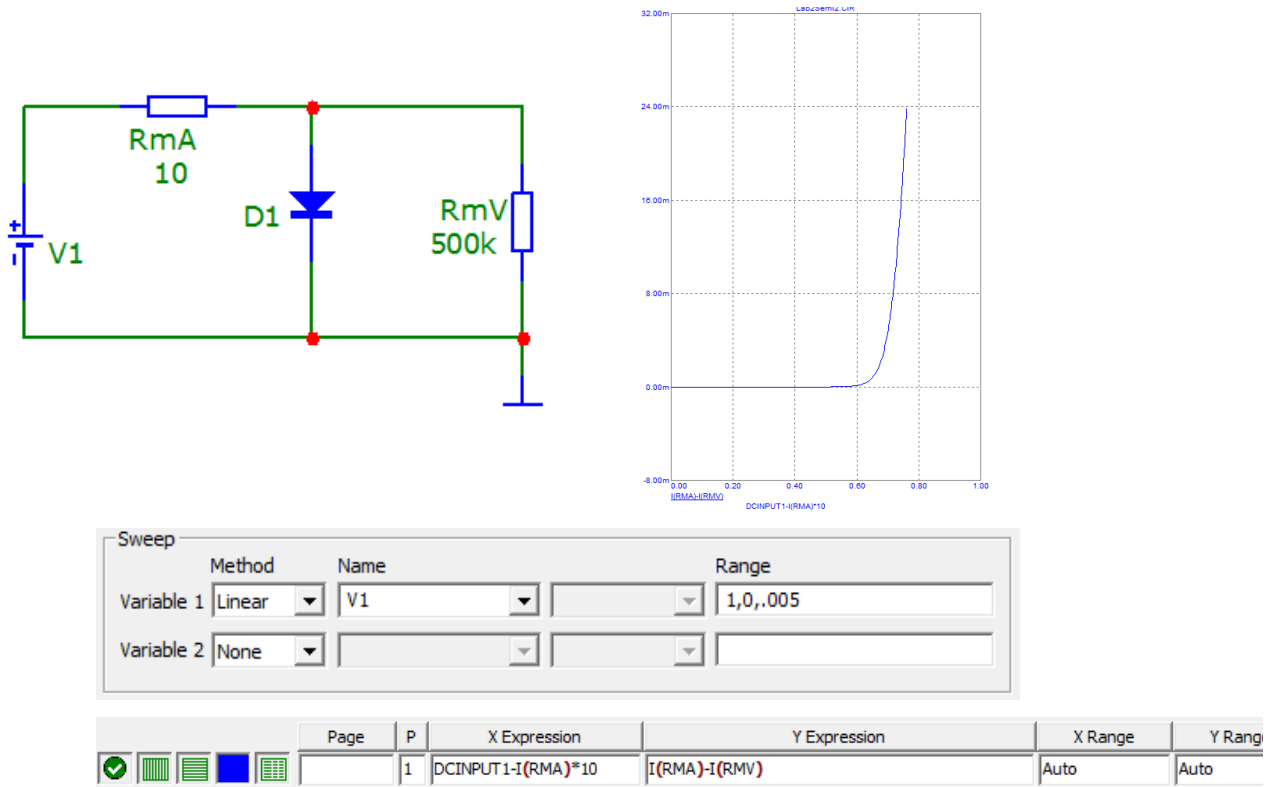


Рисунок 7

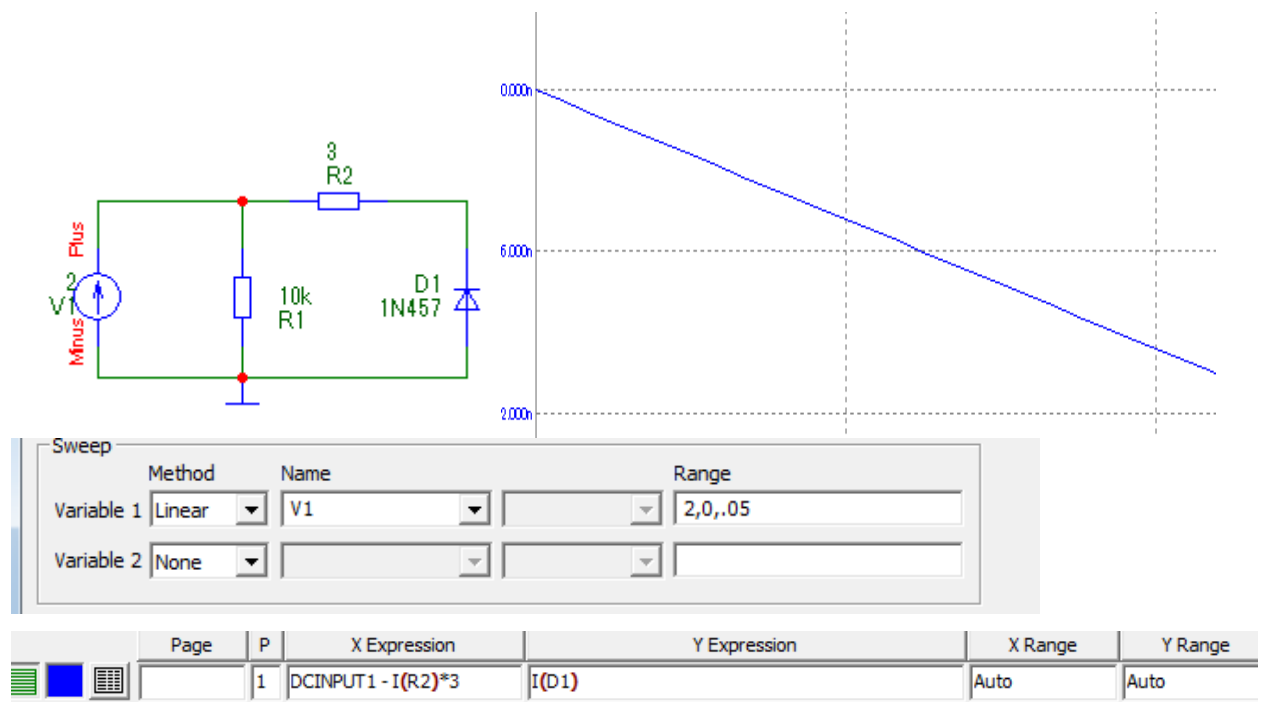
Формула для определения значений по оси X учитывает, что для построения графика, зависящего от напряжения на диоде, необходимо учесть падение напряжения на миллиамперметре. В конкретном случае сопротивление миллиамперметра определено как 10 Ом, поэтому истинное напряжение на диоде и будет определяться выражением:

$$U_d = DCINPUT1 - I(RMA) * 10.$$

Ток через миллиамперметр определяется суммой двух токов – тока через диод и тока через милливольтметр. Поэтому для построения графика, связывающего ток диода (по оси Y) с напряжением на диоде (по оси X), используется выражение

$$I_d = I(RMA) - I(RMV).$$

В схеме определения обратного тока диода запись тока и напряжения на диоде меняются: поскольку ток через вольтметр с внутренним сопротивлением R1 значительно больше обратного тока диода, его надо исключить из измерений. Ток через амперметр с внутренним сопротивлением R2 равен обратному току диода.



Обратите внимание на порядок величины обратного тока кремниевого диода – это наноамперы ($6n = 6 \cdot 10^{-9} \text{ A}$).

ВЫВОД ДАННЫХ РЕШЕНИЯ MICROCAP ВО ВНЕШНИЙ ТЕКСТОВЫЙ ФАЙЛ

Вывод данных в тестовый файл из программы Мисгосар возможен только при нажатой экранной кнопкой, определяющей вывод в текстовый файл расчёта, рис. 8:

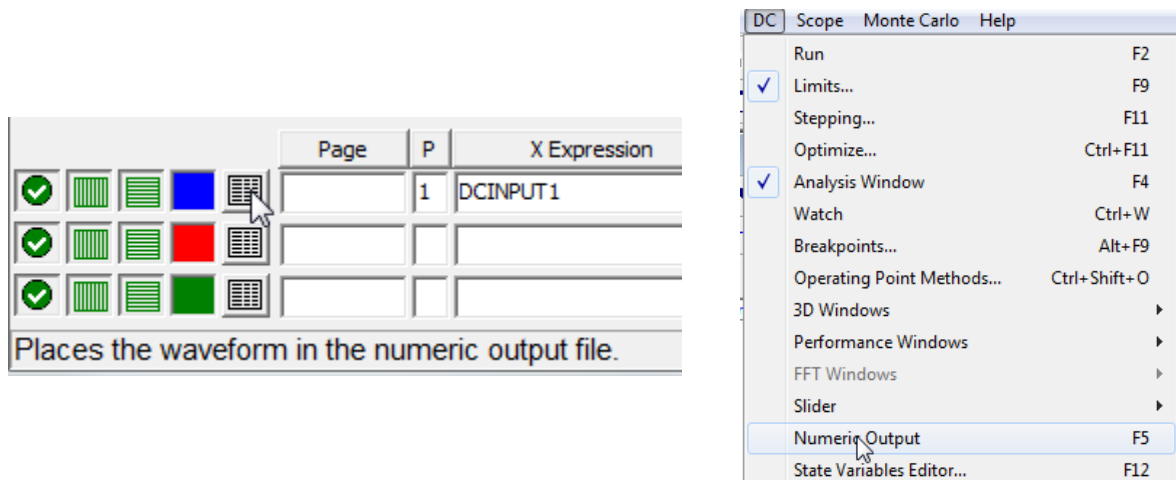


Рисунок 8

По умолчанию сформированный файл имеет имя, определённое именем схемы, но расширение этого файла будет, при использовании анализа по постоянному току “DNO”.

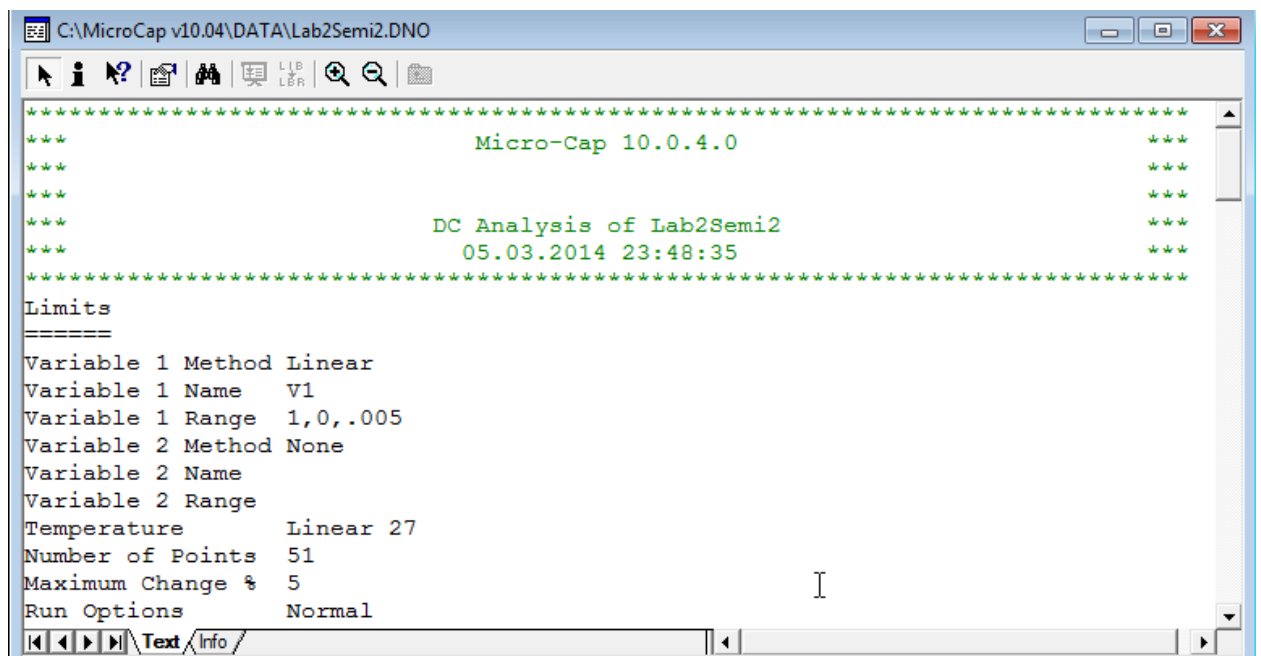
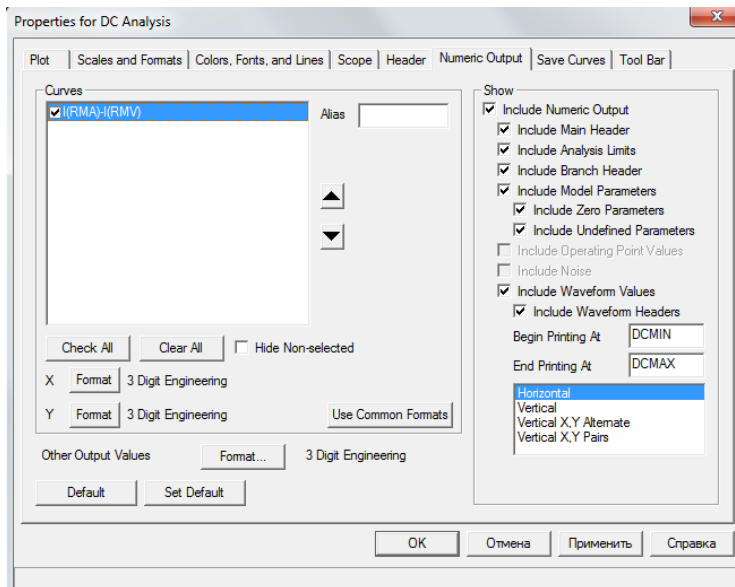


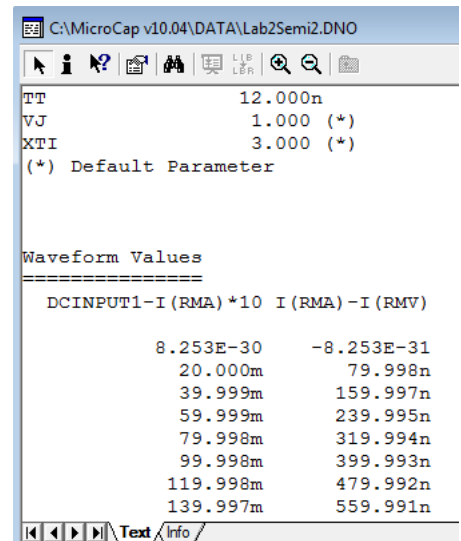
Рисунок 9

В этот файл будет выведена полная информация о задаче, версии программы и многое другое, информация о таблице значений будет размещена в самом конце этого файла. При взаимодействии с программой MCAD необходимо обеспечить только

численную информацию в выведенном файле. Это возможно при простом редактировании этого файла, но это будет требоваться каждый раз, когда будет получено решение (новые данные запишутся поверх отредактированных). Для удобства использования численного вывода можно рекомендовать установить опцию только численного расчёта. Для этого в диалоговом окне свойств графика (вызывается двойным щелчком в поле графика) в закладке Numeric Output отмечаются только флажки для появления данных без заголовков, рис. 10.



до редактирования



после редактирования

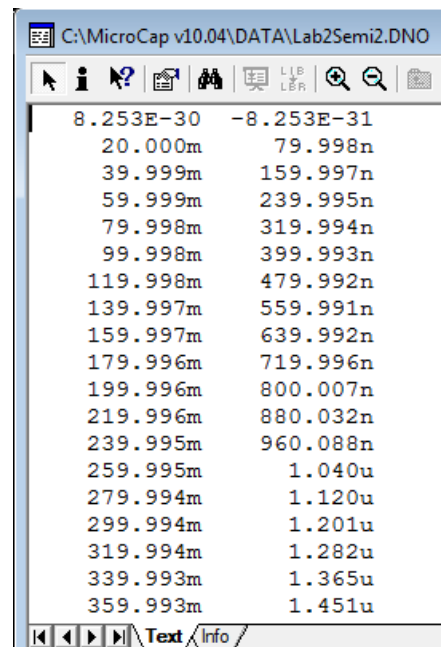
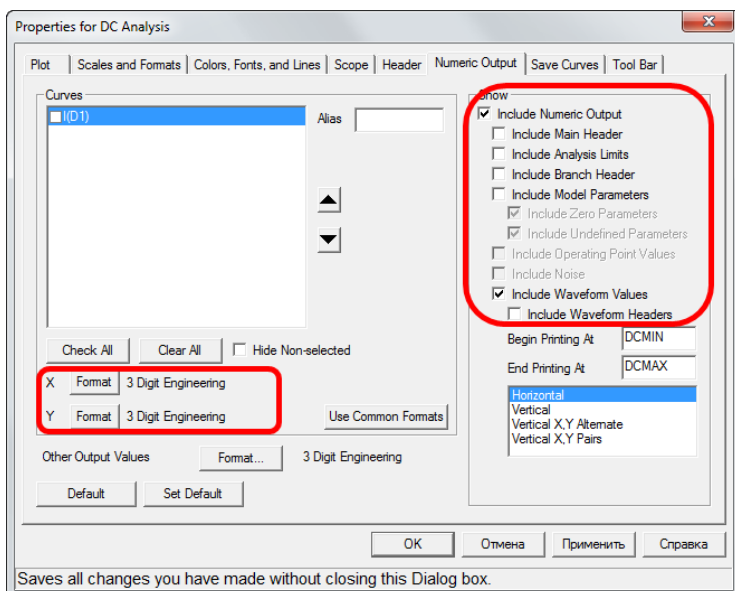


Рисунок 10

Но при этом остаются проблемы восприятия, чтения данных из файла, сформированного в Numeric Output программы математической обработки данных. Мисросар использует формат вывода численных данных с буквенными множителями (m – Полупроводниковые диоды. Мисросар [Оглавление](#) Загидуллин Р.Ш.

мили, множитель 10-3). На закладке Scales and Formats диалогового окна свойств графика можно исправить этот формат на читаемый MCAD-ом десятичный. Вызывается это окно свойств двойным щелчком в поле графика. Здесь изменяется формат Scale и Cursor как для оси X так и для оси Y, рис. 11. В старых версиях MCxx для изменения формата надо открыть Scales & Formats того же окна.

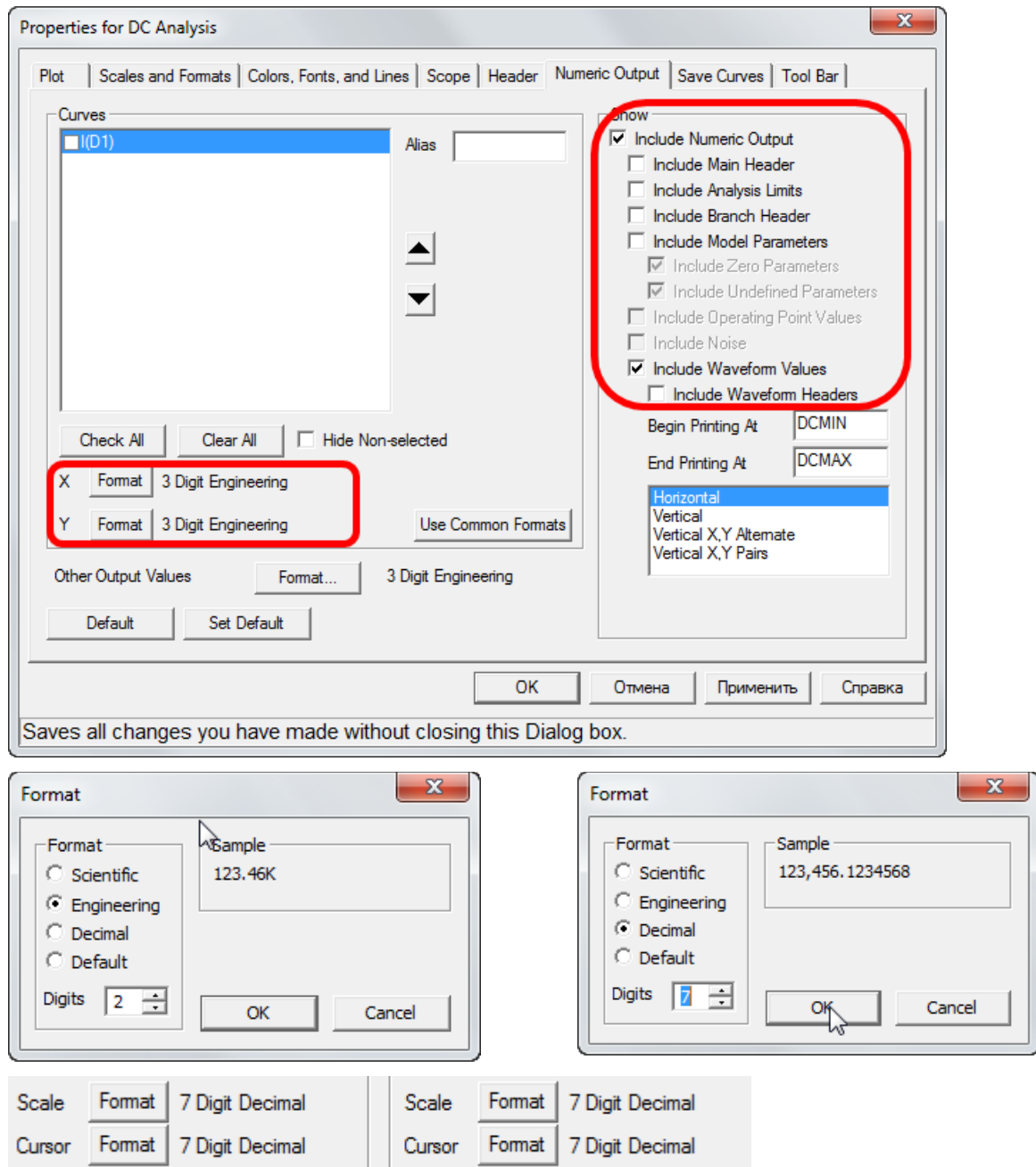
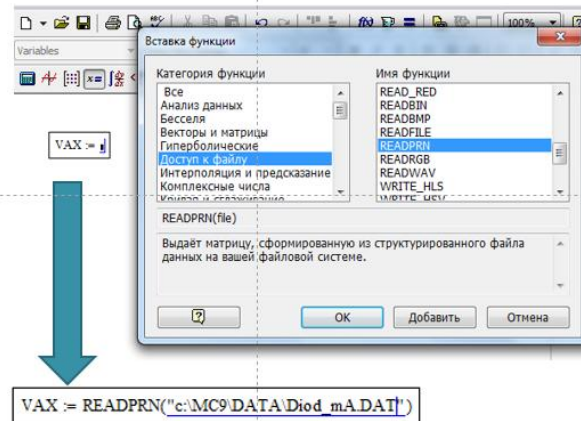


Рисунок 11

После проведения всех настроек имеет смысл проверить состояние файла, предназначенного для передачи в MCAD.

ЧТЕНИЕ ДАННЫХ ИЗ ТЕКСТОВОГО ФАЙЛА В MC_{XX} В ПРОГРАММУ MATHCAD (MCAD)

Пусть в результате моделирования был сформирован файл Diod_mA.DAT. Он был сохранен по адресу в каталоге C:\MC9\DATA. В MCAD может быть задана переменная VAX, которой и должен быть назначен результат чтения из файла данных, рис. 12. Этот результат представляет собой матрицу из двух столбцов.




VAX := READPRN("c:\MC9\DATA\Diod_mA.DAT")

VAX := READPRN("C:\MC10\STUDENT\circuit5.DNO")

VAX =

	0	1
0	0	0
1	0.02	-2·10 ⁻⁵
2	0.04	-4·10 ⁻⁵
3	0.06	-7·10 ⁻⁵
4	0.08	-1·10 ⁻⁴
5	0.1	-1.4·10 ⁻⁴
6	0.12	-2.1·10 ⁻⁴
7	0.14	-2.9·10 ⁻⁴
8	0.16	-4.2·10 ⁻⁴
9	0.181	-6·10 ⁻⁴

Рисунок 12

Что бы выделить столбец, нужно записать имя переменной - VAX, нажать на  - кнопку выделения столбца матриц и указать столбец (в данном случае 0 или 1) рис.13.

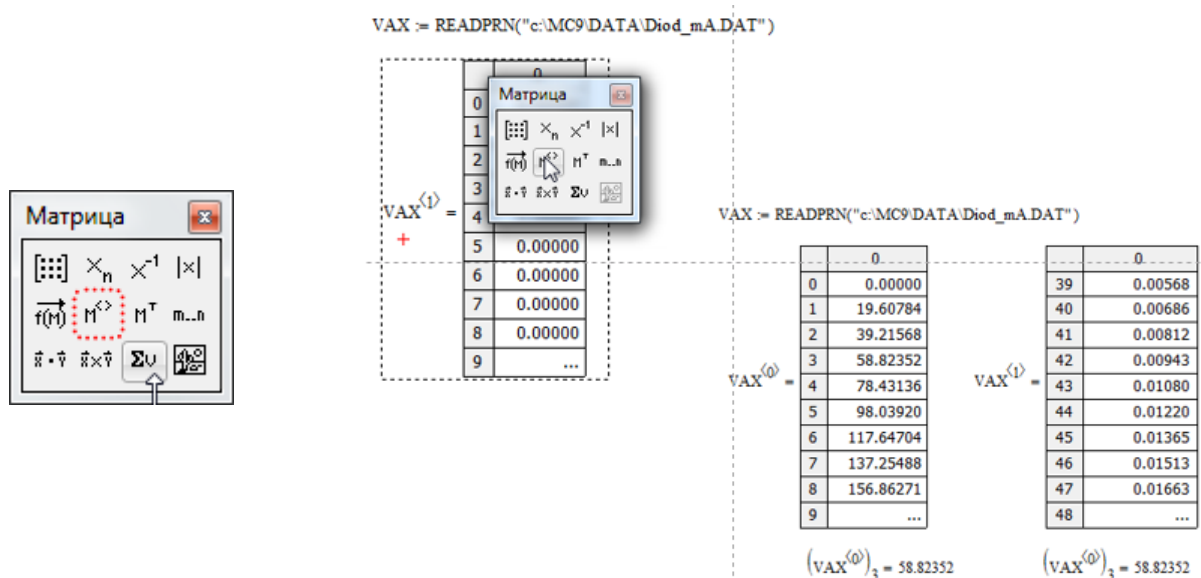


Рисунок 13

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА VAX В MSAD ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ

Для построения графиков (меню Вставка -> Графики) используются шаблоны. Их перечень содержится в команде. Чтобы изменить вид изображения, нужно щелкнуть дважды по полю графика и установить требуемые параметры в окнах настройки. Большинство параметров графического процессора, необходимых для построения графиков, по умолчанию задается автоматически.

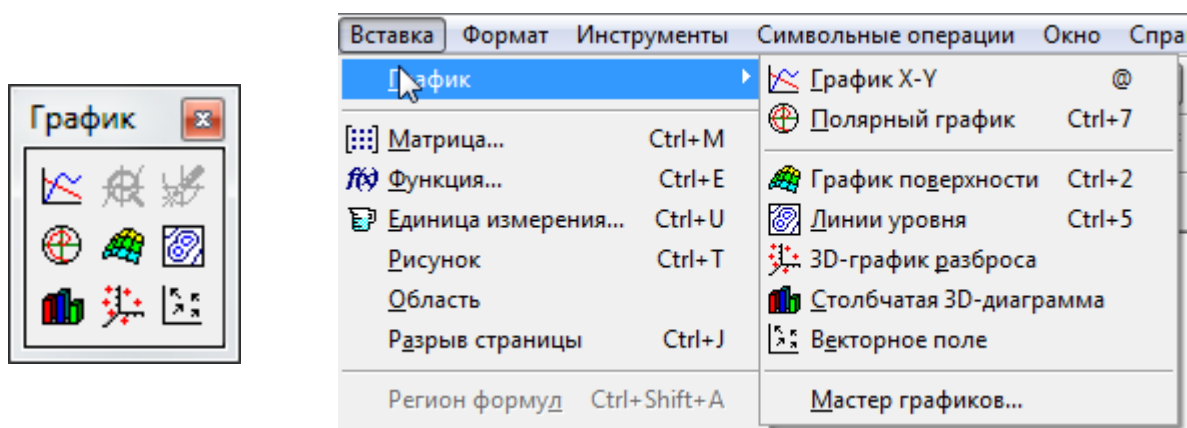


Рисунок 14

Каждый из столбцов матрицы может быть определён как переменная по осям графика, рис 15.

Вставка -> Графики-> График X-Y, по оси X – VAX 0, по оси Y – VAX

1. Результат – рис. 15.

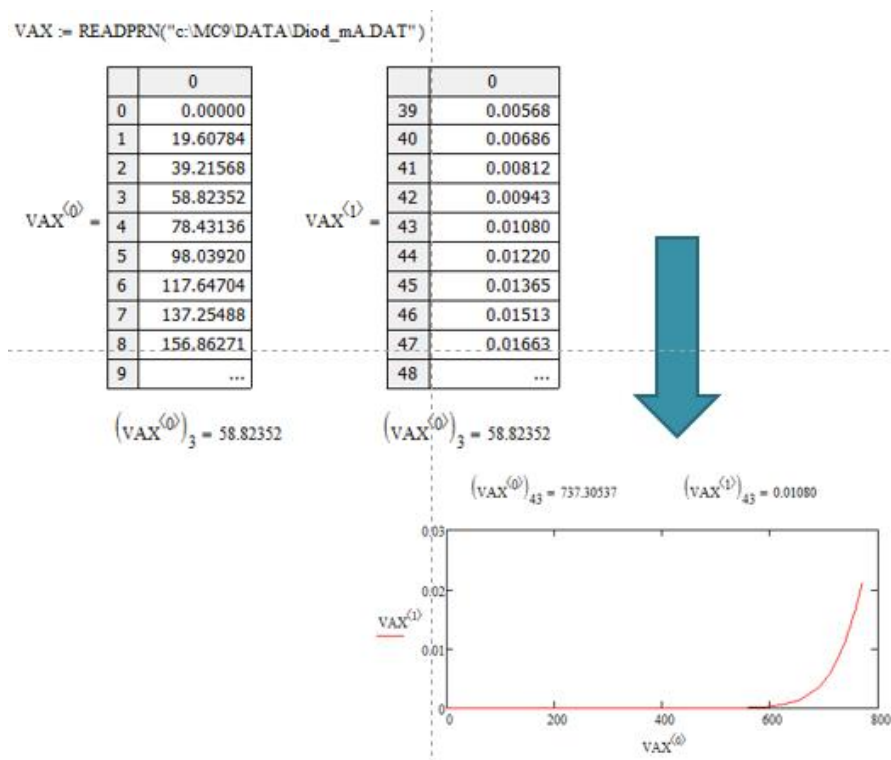


Рисунок 15

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

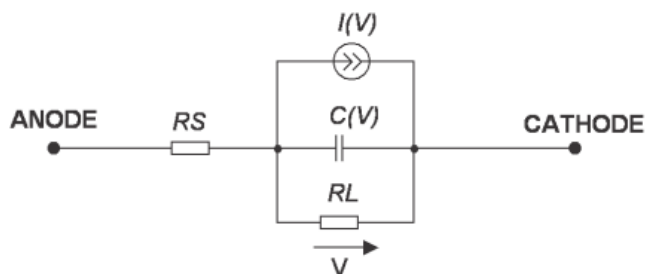
Математическую модель элемента можно рассматривать как некоторый оператор F , ставящий в соответствие системе внутренних параметров компонента или схемы $\{X=x_1, x_2, \dots, x_n\}$ совокупность связанных с ними внешних параметров $\{Y=y_1, y_2, \dots, y_n\}$.

Содержание внутренних и внешних параметров, их физический смысл меняется в зависимости от назначения модели. Математические модели технических устройств быть классифицированы по ряду признаков: по характеру отображаемых процессов выделяют статические и динамические модели. По способу представления модели различают аналитические, графические и табличные. Аналитические модели определяют прибор или компонент в виде уравнений, описывающих его ВАХ или в форме дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в моделируемой схеме и характеризующие инерционность элемента.

Графические модели позволяют представить компоненты в виде графиков ВАХ или в виде эквивалентных схем замещения. Табличные модели позволяют представить схему или элемент в виде цифровых таблиц, полученных в ходе экспериментального

исследования объекта моделирования и соответствующих графикам экспериментальных ВАХ. Табличные модели используют обычно в том случае, если аналитическую модель построить трудно вследствие сложной зависимости.

Модель полупроводникового диода в программе Мисросар имеет следующий вид, рис. 15 :



Эквивалентная схема модели диода

Рисунок 15

Полная математическая модель (вариант модели PSPICE) диода задаётся параметрами, перечисленными в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение	Параметр модели
IS	Ток насыщения при температуре 27°C
RS	Объемное сопротивление
N	Коэффициент эмиссии (не идеальности)
ISR	Параметр тока рекомбинации
NR	Коэффициент эмиссии (не идеальности) для тока ISR
IKF	Предельный ток при высоком уровне инжекции
TT	Время переноса заряда
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении
VJ	Контактная разность потенциалов
M	Коэффициент плавности p-n перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — плавного)
EG	Ширина запрещенной зоны
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещённого перехода
BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)

Обозначение	Параметр модели
NBV	Коэффициент не идеальности на участке пробоя
IBVL	Начальный ток пробоя низкого уровня
NBVL	Коэффициент не идеальности на участке пробоя низкого уровня
XTI	Температурный коэффициент тока насыщения IS
TIKF	Линейный температурный коэффициент IKF
TBV1	Линейный температурный коэффициент BV
TBV2	Квадратичный температурный коэффициент BV
TRS1	Линейный температурный коэффициент RS
TRS2	Квадратичный температурный коэффициент RS
KF	Коэффициент фликкер-шума
AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума
RL	Сопротивление утечки перехода

Параметры модели диода, отвечающие за его частотные свойства, определены как:

ОБОЗНАЧЕНИЕ	Параметр модели
TT	Время переноса заряда
CJO	Барьерная ёмкость при нулевом смещении
VJ	Контактная разность потенциалов
M	Коэффициент плавности р-п перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — плавного)
EG	Ширина запрещённой зоны
FC	Коэффициент нелинейности барьерной ёмкости прямо смещённого перехода

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ ТРЕХ ОРДИНАТ

Для получения математической модели диода на основе экспериментов, нужно иметь уравнение приближенного описания модели в заданной области и ряд экспериментально полученных точек в этой области.

Простейшая модель диода с учётом объёмного сопротивления области базы описывается уравнением

$$I_d = I_0 * (\exp(\frac{U_d - I_d * R_b}{N * F_t}) - 1)$$

, где I_0 – обратный ток перехода, R_b – объёмной сопротивление базы, $N * F_t$ – тепловой потенциал (зависит от температуры и материала).

Решая это уравнение относительно напряжения (используя символьное решение в MCAD) можно получить выражение относительно напряжения:

$$U_d = I_d * R_b + N * F_t * \ln(\frac{I_d + I_0}{I_0})$$

Для определения трёх неизвестных **R_b** , **$N * F_t$** и **I_0** следует взять три экспериментальных отсчёта (точки) статической характеристики, получить и решить систему из трёх нелинейных уравнений.

Для упрощения решения при выборе отсчётов $I_d(U_d)$ целесообразно обеспечить неравенство $I_d' \gg I_0$. Это позволит заменить уравнение для напряжения упрощёнными

$$\begin{cases} R_b = \frac{(U_{d1}' - 2 * U_{d2}' + U_{d3}')}{I_{d1}'} \\ N * F_t = \frac{(3 * U_{d2}' - 2 * U_{d1}' - U_{d3}')}{\ln(2)} \\ I_0 = I_{d1}' * \exp(\frac{-(2 * U_{d2}' - U_{d3}')}{N * F_t}) \end{cases}$$

В рассмотренном примере требуется достаточно точное определение значений U_{di}' , которое не всегда удаётся обеспечить. Это требование можно ослабить при выборе для параметра ($N * F_t$) его теоретического значения, зависящего от температуры и свойств полупроводника.

$$N * Ft = \frac{kT}{q} = \frac{273 + T^0 C}{11608}$$

В этом случае остальные параметры R_b и I_o определяются по двум точкам I_{d1}' и $2 * I_{d1}'$, что соответствует системе уравнений:

$$\begin{cases} U_{d1}' = R_b * I_{d1}' + N * Ft * \ln\left(\frac{I_{d1}'}{I_o}\right) \\ U_{d2}' = 2 * R_b * I_{d1}' + N * Ft * \ln\left(\frac{2 * I_{d1}'}{I_o}\right) \end{cases}$$

С решением:

$$\begin{cases} R_b = \frac{(U_{d1}' - 2 * U_{d2}' + U_{d3}')}{I_{d1}'} \\ I_o = I_{d1}' * \exp\left(\frac{(U_{d2}' - 2 * U_{d1}')}{N * Ft}\right) \end{cases}$$

В программе MCAD производится а) считывание таблицы значений V_{AX} из текстового файла с использованием функции READPRN, б) строится график V_{AX} и в) используется введённая таблица данных.

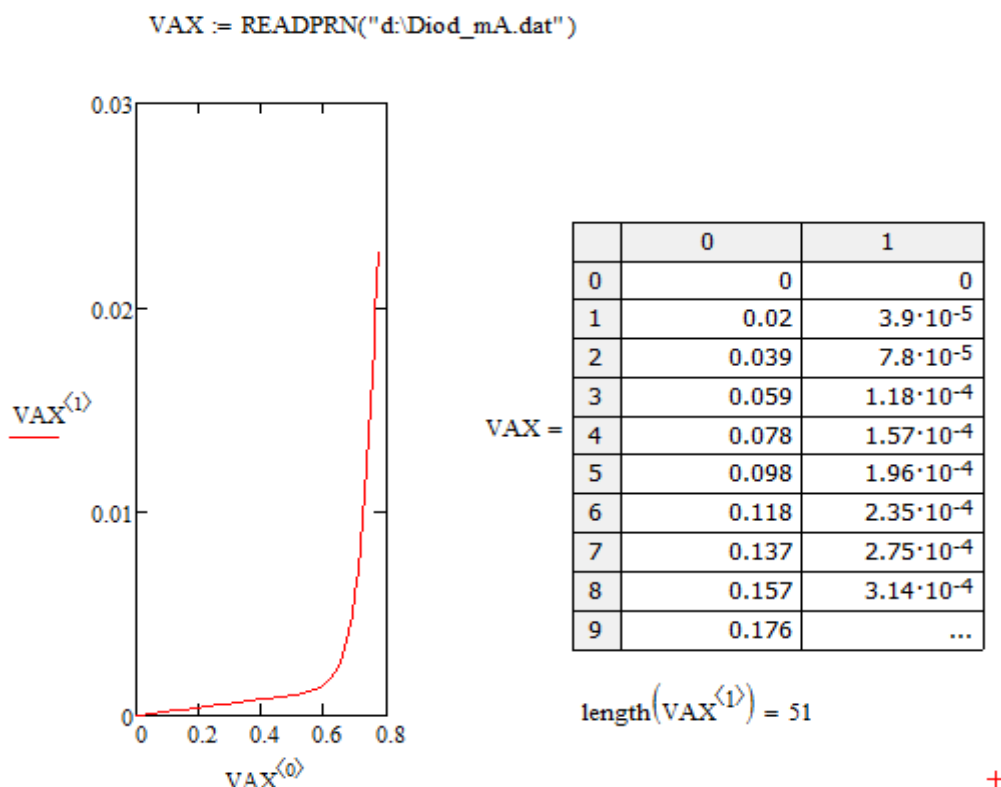


Рисунок 16. Таблица экспериментальных значений тока и напряжения на диоде и соответствующий график в Mathcad.

После чего рассчитываются по упрощенным формулам параметры модели.

Плотность данных (число точек), полученных в процессе эксперимента, может не удовлетворить расчёт - значения тока и напряжения, которые соответствуют условиям половинного тока и одной четвертой тока, не будут найдены. Например, в исходной таблице не найдены токи, которые соответствуют половине максимального тока и одной четверти максимального и, даются лишь ближайшие точки (индексы) искомых значений:

$$\begin{aligned} Id3 &:= \max(VAX^{(1)}) & Id3 &= 0.023 \\ \text{Значение индекса максимального тока} & & nMax &:= \text{match}(Id3, VAX^{(1)}) \\ & & nMax &= (50) \\ \text{Значение максимального напряжения для максимального тока} & & & \\ Ud3 &:= (VAX^{(0)})_{50} & Ud3 &= 0.772 \\ nId1 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{4}, VAX^{(1)}\right) & nId2 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{2}, VAX^{(1)}\right) \\ nId1 &= \begin{pmatrix} 37 \\ 38 \end{pmatrix} & nId2 &= \begin{pmatrix} 42 \\ 43 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Рисунок 17

Поэтому может потребоваться интерполяция между узловыми точками графика для определения значений пары ток и напряжение для заданного тока в расчёте.

$$\begin{aligned} Ud1 &:= \text{linterp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{4}\right) & Ud1 &= 0.697 & Id1 &:= \frac{Id3}{4} \\ Ud2 &:= \text{linterp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{2}\right) & Ud2 &= 0.733 & Id2 &:= \frac{Id3}{2} \\ Rb &:= \frac{(Ud1 - 2 \cdot Ud2 + Ud3)}{Id1} & Rb &= 0.414 \\ NFt &:= \frac{[(3 \cdot Ud2 - 2 \cdot Ud1) - Ud3]}{\ln(2)} & NFt &= 0.049 \\ Is0 &:= Id1 \cdot \exp\left[\frac{-1}{NFt} \cdot (2 \cdot Ud1 - Ud3)\right] & Is0 &= 1.572E-008 \end{aligned}$$

Рисунок 18

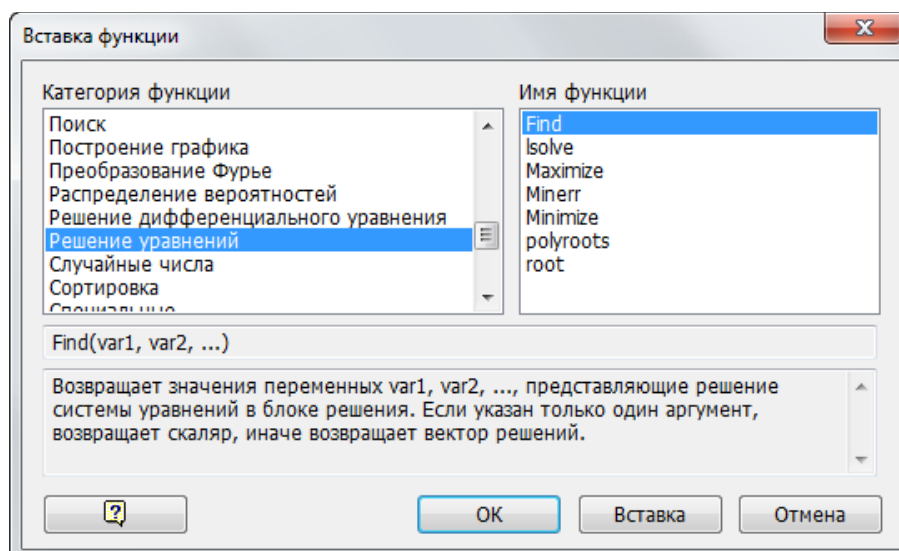
Приближенно определить значения между узловыми точками можно на графике ВАХ рис. 19, отключив маркер точки данных:



Рисунок 19

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ GIVEN MINERR

Решение систем линейных и нелинейных уравнений и неравенств возможно с помощью вычислительного блока **Given**, в который входят функции Find, Minerr, Maximize, Minimize. Minerr рекомендуется использовать, если система не может быть решена точно и следует найти наилучшее приближение, которое обеспечивает минимальную погрешность. Система уравнений или неравенств должна быть записана после или правее ключевого слова Given.



Для решения системы уравнений с помощью функции *Find* необходимо выполнить следующее:

1. Задать начальное приближение для всех неизвестных, входящих в систему уравнений. MathCAD решает систему с помощью итерационных методов;
2. Напечатать ключевое слово *Given*. Оно указывает MathCAD, что далее следует система уравнений;
3. Ввести уравнения и неравенства в любом порядке. Для печати символа $=$ использовать $[Ctrl]=$. Между левыми и правыми частями неравенств может стоять любой из символов $<$, $>$, \geq и \leq ;
4. Ввести любое выражение, которое включает функцию *Find*, например: $x := \text{Find}(x, y)$.

$x1 := 0$ $x2 := 0$ $x3 := 0$ $x4 := 0$ Начальные приближения
Given
 $x1 + 2x2 + 3x3 + 4x4 = 30$
 $-x1 + 2 \cdot x2 - 3 \cdot x3 + 4x4 = 10$
 $x2 - x3 + x4 = 3$
 $x1 + x2 + x3 + x4 = 10$
 $\text{Find}(x1, x2, x3, x4) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}$

Функция ***Minner*** очень похожа на функцию ***Find*** (использует тот же алгоритм). Если в результате поиска не может быть получено дальнейшее уточнение текущего приближения к решению, *Minner* возвращает это приближение.

Пример определения параметров модели полупроводникового диода методом *GIVEN MINERR* показан ниже на листингах. Для каждого варианта задания выбранные

значения тока и напряжения должны соответствовать своей ВАХ, полученной экспериментально.

Вычисление ВАХ при заданных параметрах

$$x := 10^{-0} \quad F(x) := x \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + x)}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft$$

$$F(x) = 2.174$$

Заданные параметры модели

$$R_b = 1 \quad IS = 1 \times 10^{-10} \quad m = 2$$

$$Ft = 0.026$$

Given открывает блок решения системы

$$0.823 = 10^{-3} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-3})}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft$$

первая точка ВАХ, заданная током и напряжением

$$0.949 = 10^{-2} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-2})}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft$$

вторая точка ВАХ, заданная током и напряжением

$$1.157 = 10^{-1} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-1})}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft$$

третья точка ВАХ, заданная током и напряжением

$$2.174 = 10^{-0} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-0})}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft$$

четвертая точка ВАХ, заданная током и напряжением

Diod_P := Minerr(IS, Rb, m, Ft)

$$\text{Diod_P} = \begin{pmatrix} 1.013 \times 10^{-10} \\ 1 \\ 1.972 \\ 0.026 \end{pmatrix}$$

$$\text{Diod_P}_0 = 1.013 \times 10^{-10} \quad \text{Diod_P}_1 = 1 \quad \text{Diod_P}_2 = 1.972 \quad \text{Diod_P}_3 = 0.026$$

Проверка решения:

$$Id := 10^{-3}$$

$$F(Id) := Id \cdot \text{Diod_P}_1 + \ln \left[\frac{(\text{Diod_P}_0 + Id)}{\text{Diod_P}_0} \right] \cdot \text{Diod_P}_2 \cdot \text{Diod_P}_3$$

$$F(Id) = 0.823$$

Рисунок 20. Пример определения параметров теоретической модели диода.

Примечание: Функции *Find*, *Minerr* должны иметь столько же или меньше аргументов, сколько уравнений и неравенств содержит блок *Given* (максимальное число уравнений доведено до 200 в последних версиях MCAD). Если окажется, что блок содержит слишком мало уравнений или неравенств, то блок может быть дополнен тождествами или повторяющимися выражениями. Блок *Given* не рекомендуется использовать для поиска индексированных переменных.

ПОСТРОЕНИЕ ВАХ ЗАДАННОЙ ТАБЛИЦЕЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ НА ОДНОМ ГРАФИКЕ

Сравнить результат моделирования и эксперимента можно, построив на одном графике ВАХ экспериментальную и ВАХ модельную. Построение графика, заданного функциональной зависимостью, показано на листинге рис. 21. В формулу следует подставлять табличные значения тока, а по формуле будет вычислено значение напряжения. Совместив два этих графика можно получить сравнение эксперимента и данных расчета по модели.

$$I_d = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{U_d - I_d \cdot R_b}{N F_t}\right) - 1 \right) \quad \text{Запись уравнения для модели диода } U_d$$

имеет решение(я)

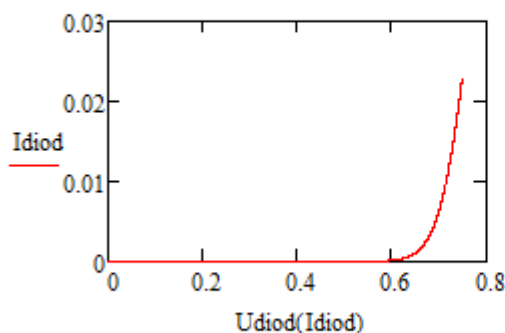
$$N F_t \cdot \ln\left(\frac{I_d + I_o}{I_o}\right) + I_d \cdot R_b$$

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ВАХ ДИОДА ПО ФОРМУЛЕ:

$$R_b := 1 \quad N F_t := 0.0255 \quad I_{s0} := 10^{-14}$$

$$I_{diod} := 0, 10^{-5} \dots 0.023 \quad \text{ранжированная переменная тока диода}$$

$$U_{diod}(I_{diod}) := I_{diod} \cdot R_b + N F_t \cdot \ln\left(\frac{I_{diod} + I_{s0}}{I_{s0}}\right)$$



$I_{diod} =$

0.00000
0.00001
0.00002
0.00003
0.00004
0.00005
0.00006
0.00007
0.00008
0.00009
...

+

Рисунок 12

На графике необходимо совместить исходную кривую, представленную входными табличными данными и график модели, определенный формулой. Ниже показано, как в MCAD получено выражение для напряжения на диоде из формулы, в которой переменные ток и напряжение не разделены

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ВАХ МОДЕЛИ И ИСХОДНЫХ ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ:

$Rb1 := 1.2$ $Nft1 := 0.0255$ $Is01 := 22.7 \cdot 10^6$ данные расчета

Ранжированная переменная Idiod

$$Idiod := 0, 10^{-5} \dots 0.023 \quad Uformula(Idiod) := Idiod \cdot Rb1 + Nft1 \cdot \ln\left(\frac{Idiod + Is01}{Is01}\right)$$

Чтение данных из файла эксперимента и переопределение значений тока:

$$VAX := READPRN("ВАХ ДИОДА ПРЯМАЯ ВЕТВЬ.DNO") \quad Idiod := VAX^{(1)}$$

$$VAX^{(0)} =$$

	0
0	0.40000
1	0.40700
2	0.41400
3	0.42100
4	0.42800
5	...

$$VAX^{(1)} =$$

	0
0	0.00000
1	0.00000
2	0.00000
3	0.00000
4	0.00000
5	...

$$Idiod =$$

	0
0	0.00000
1	0.00000
2	0.00000
3	0.00000
4	0.00000
5	...

Проверка по напряжению модели и эксперимента $(VAX^{(0)})_{45} = 0.71500$

$$Iproverka := (VAX^{(1)})_{45} \quad (VAX^{(1)})_{45} = 0.04704 \quad Uformula(Iproverka) = 0.05645$$

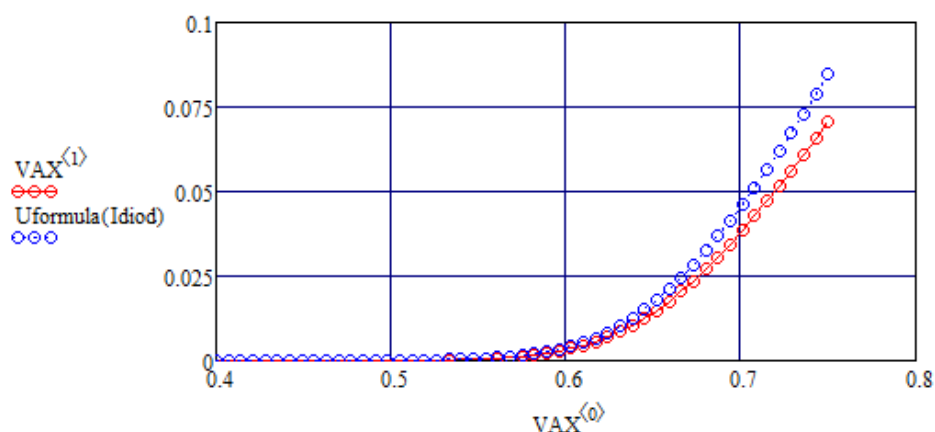


Рисунок 13

Проверить совпадение можно с использованием приема трассировки графика средствами MCAD. Для этого необходимо, после выбора графика, перейти в меню Формат->Графики->Трассировка

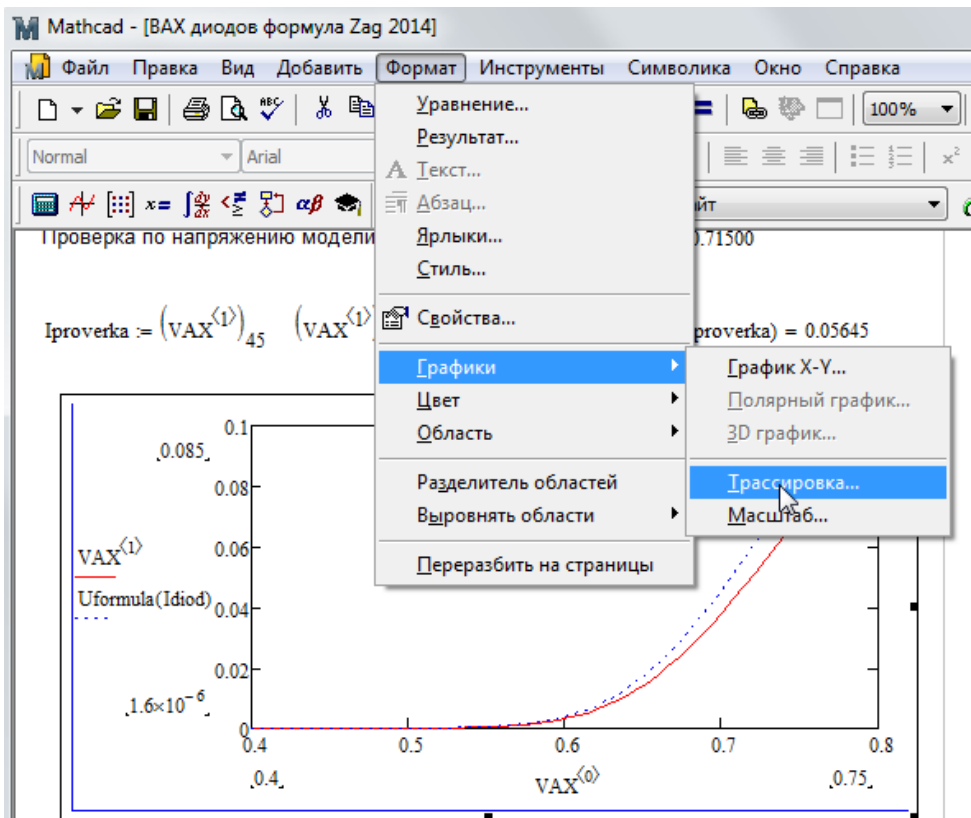


Рисунок 14

Перемещая курсор внутри графика, определяются значения тока и напряжения первого и второго графика:

$$I_{proverka} := (VAX^{(1)})_{45} \quad (VAX^{(1)})_{45} = 0.04704 \quad U_{formula}(I_{proverka}) = 0.05645$$

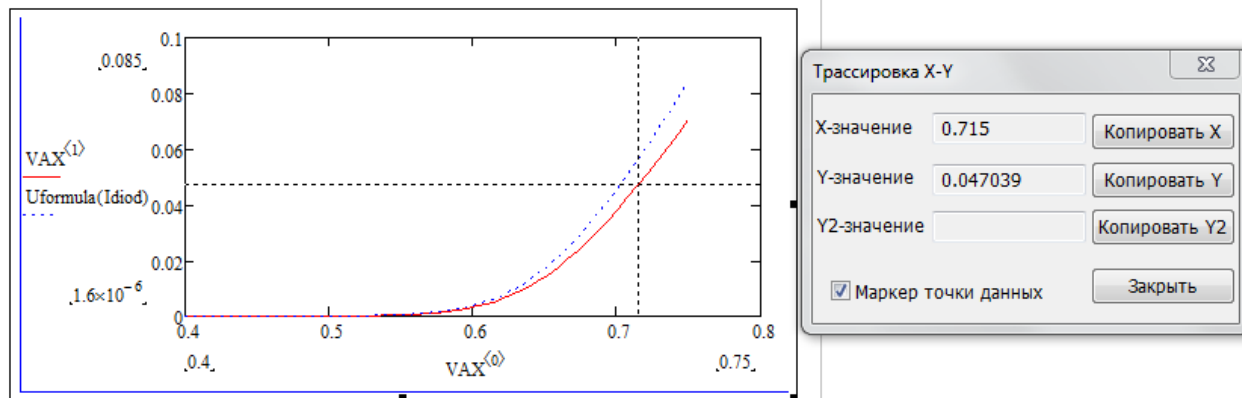


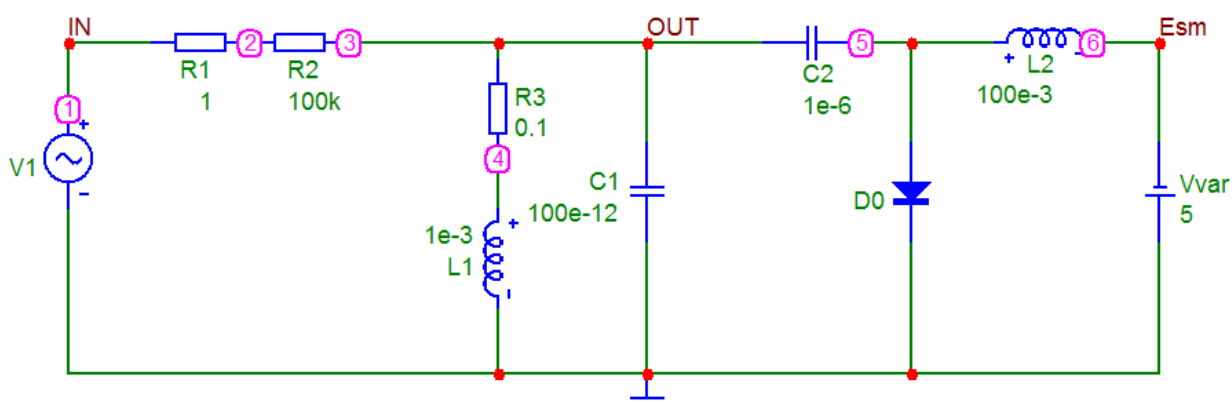
Рисунок 15

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ ДИОДА

Диод, включенный в обратном направлении, постоянный ток не пропускает и представляет собой емкость, управляемую напряжением.

Контур на рис. 25 образован элементами L_1 , C_1 и емкостью обратносмещенного перехода диода D_0 . Емкость C_2 разделительная, предотвращает замыкание источника V_{var} через контур на землю и не влияет на емкость контура. Индуктивность (дрессель) L_2 препятствует замыканию высокой частоты генератора на землю через источник V_{var} . Потери в контуре моделируются сопротивлением R_3 . Резонансная частота параллельного колебательного контура предварительно может быть подсчитана по формуле Томпсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 1/f_{рез.}$$



Предварительно оценить частоту контура можно встроенным калькулятором:

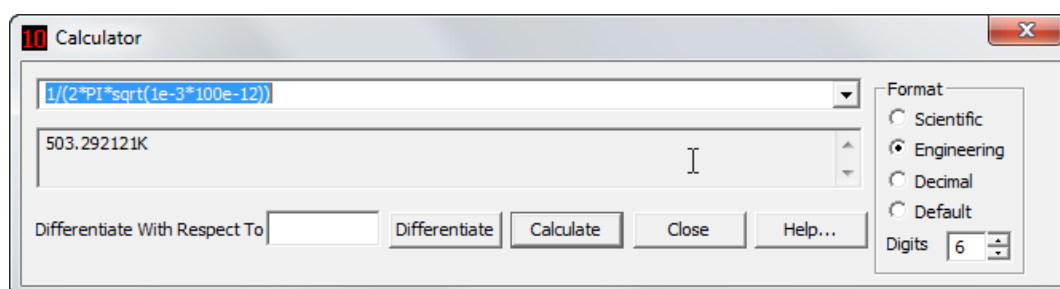


Рисунок 16

Проведение анализа по переменному току (AC) начинается с заполнения полей диалогового окна пределов частотного анализа, где определяют его параметры, рис. 26. Пределы анализа должны быть выбраны так, чтобы резонансная частота контура лежала бы в пределах от Fmax до Fmin поля Frequency Range. Вид полученного решения показан на рис.27:

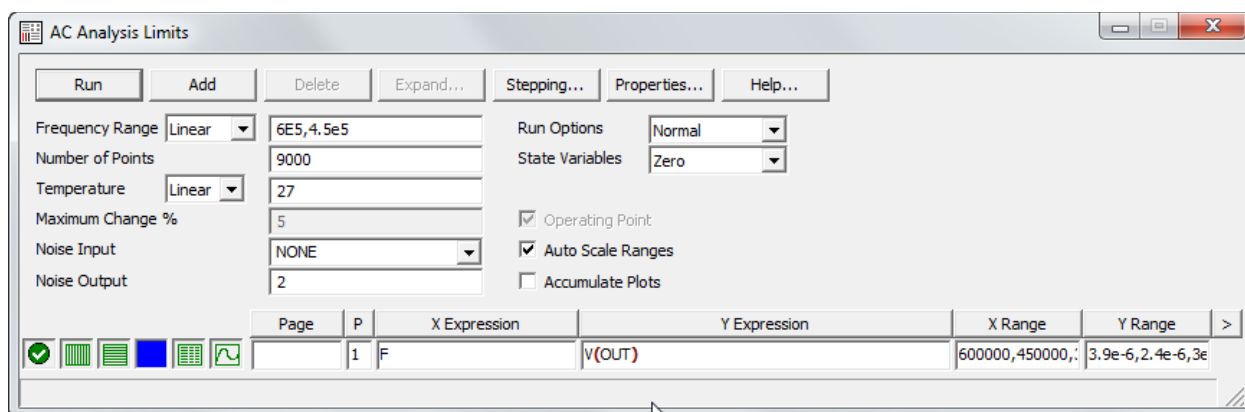


Рисунок 17 Настройка пределов анализа по переменному току (AC)

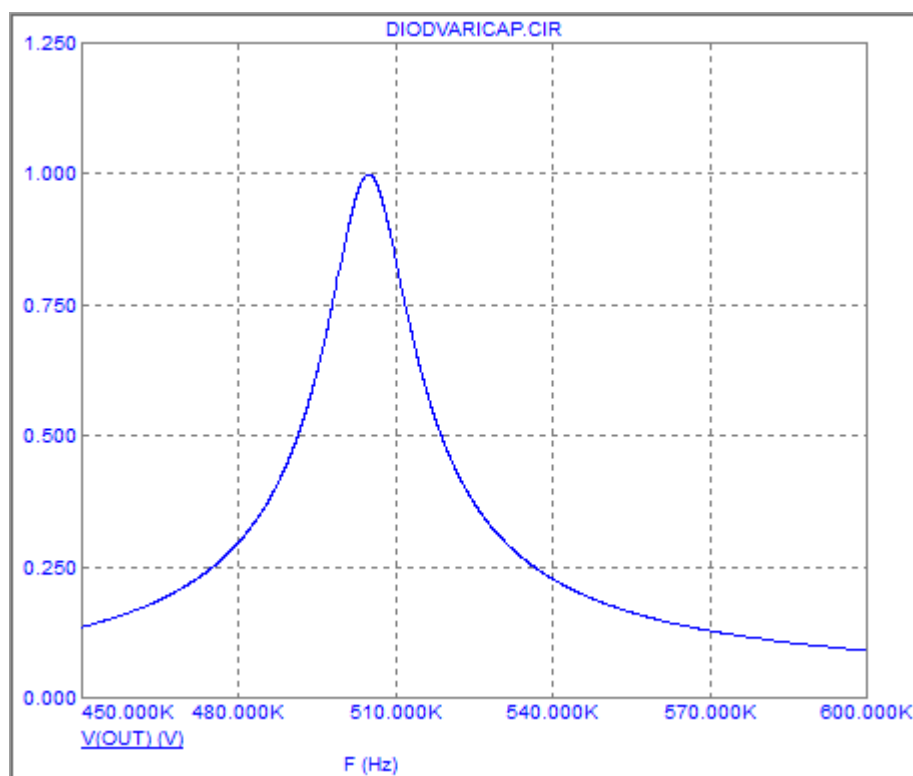


Рисунок 18. Вид резонансной кривой.

Задавая значение напряжения источника управления V_{var} , нужно зафиксировать зависимость резонансной частоты от значения напряжения.

Иногда выгодно включить многовариантный режим анализа, используя возможности режима Stepping... (доступ к режиму возможен либо через меню AC анализа, или за счёт нажатия экранной кнопки Stepping, или горячей клавиши F11), рис.28.

1:VVAR.dc 2: 3: 4: 5: 6: 7: 8: 9: 10: 11: 12: 13: ◀ ▶

Step What: VVAR dc.value

From: 1

To: 30

Step Value: 3

Step It: ☐ Yes ☒ No

Method: ☒ Linear ☐ Log ☐ List

Parameter Type: ☒ Component ☐ Model ☐ Symbolic

Рисунок 19

В диалоге задаётся параметр изменяемого компонента (Step What), границы изменения параметра (From, To, Step Value). В результате решения будут получены несколько резонансных кривых, соответствующих указанным значениям напряжения управления.

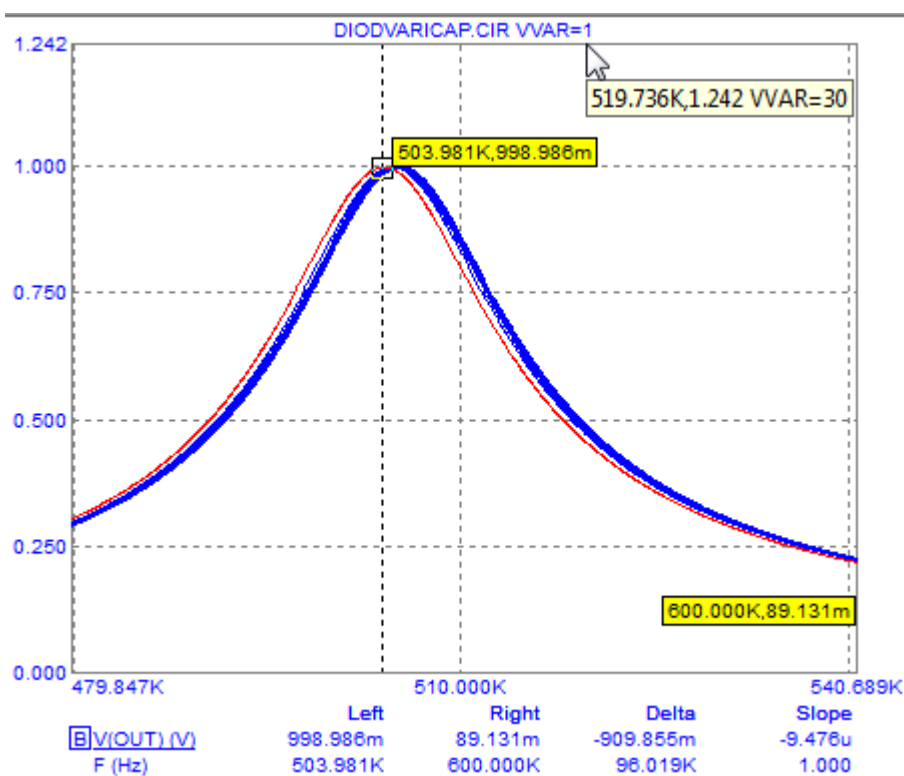


Рисунок 20

В режиме работы с курсорами в заголовке окна результата можно будет увидеть значение напряжения Vvar, и, установив курсор в максимум кривой, получить значение резонансной частоты. Зная значения резонансной частоты и значения напряжения смещения, можно рассчитать вольтфарадную характеристику.

Поскольку резонансная частота определяется по формуле Томпсона, из этой формулы можно вычислить значение ёмкости диода для напряжения управления и

построить вольтфарадную характеристику. Вид фрагмента программы *MCAD* показан ниже на рисунке:

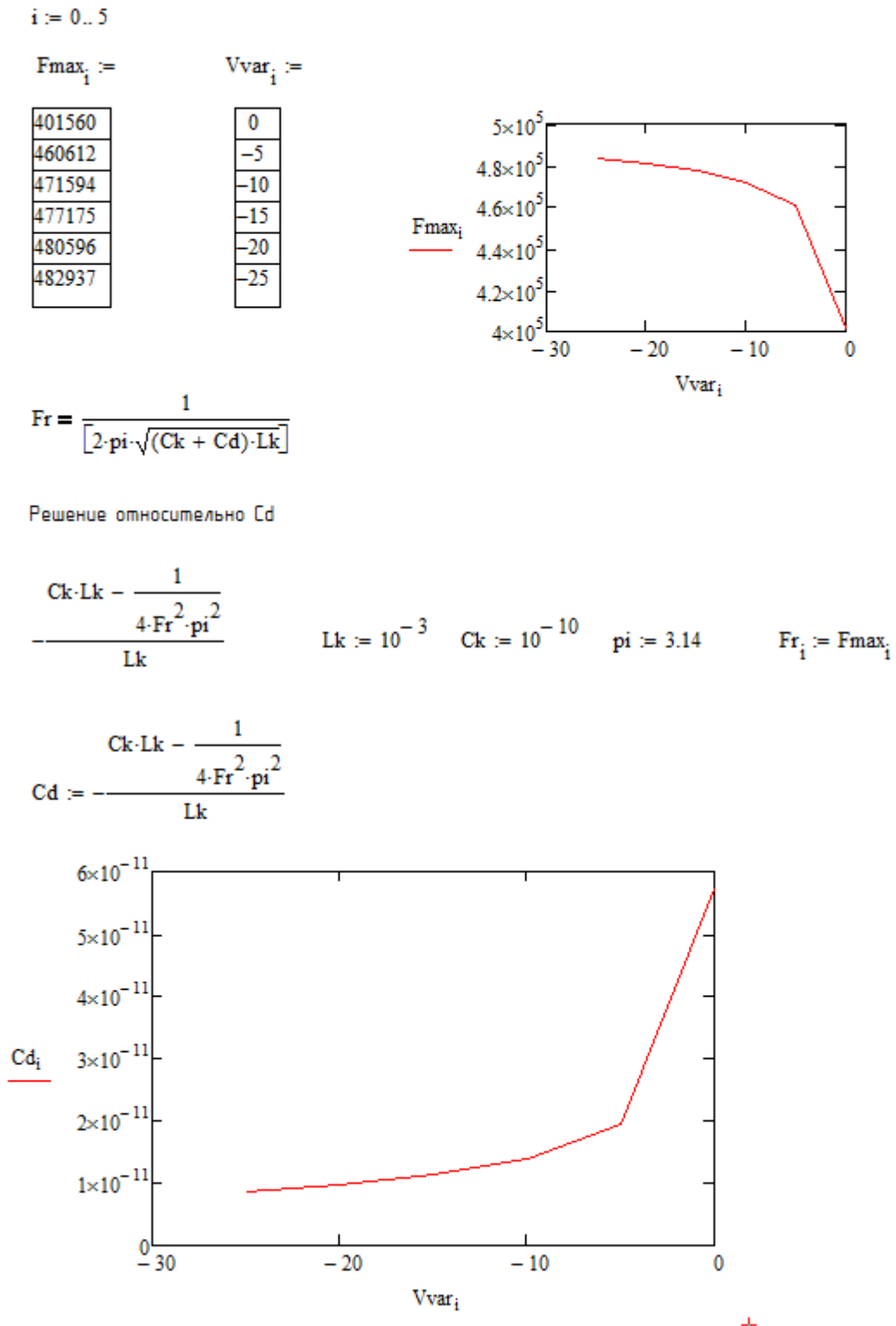


Рисунок 21

Расчёт параметров барьерной ёмкости из уравнения $Cd(U) := CJO \cdot \left(1 - \frac{U}{VJ0}\right)^{-M}$ можно провести с использованием возможностей *MCAD* – решение системы нелинейных уравнений с использованием вычислительного блока Given-Find или Given-Minerr.

В качестве примера предлагается решение системы, для которой предварительно были заданы начальные значения и построена вольтфарадная характеристика рис.31:

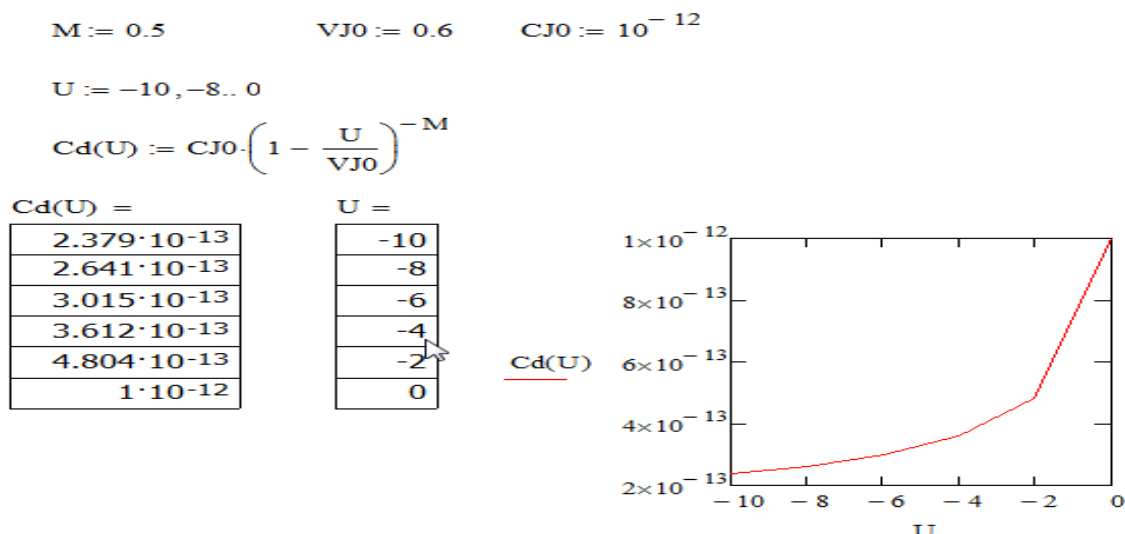


Рисунок 22

Решение системы будет выглядеть так (рис.32):

Given	Given
$\left(2.379 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-10}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(2.379 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-10}{VJ0}\right)^{-M}$
$\left(4.804 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-2}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(4.804 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-2}{VJ0}\right)^{-M}$
$\left(3.612 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-4}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(3.612 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-4}{VJ0}\right)^{-M}$
$\left(3.015 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-6}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(3.015 \times 10^{-13}\right) \blacksquare CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-6}{VJ0}\right)^{-M}$
$\text{find}(CJ0, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 9.982 \times 10^{-13} \\ 0.604 \\ 0.501 \end{pmatrix}$	$\text{minerr}(CJ0, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 9.982 \times 10^{-13} \\ 0.604 \\ 0.501 \end{pmatrix}$

Рисунок 23

Получившиеся значения параметров диода **после подстановки своих значений** необходимо сравнить со значениями одноименных параметров, указанных в программе Microsar.

*) Параметр модели EG - ширина запрещённой зоны, зависит от материала диода, для кремния EG= 1.1 ЭВ; для германия EG = 0.67 ЭВ.

ВКЛЮЧЕНИЕ МОДЕЛИ В БАЗУ ДАННЫХ ПРОГРАММЫ MICROCAP (ИУ7 НЕ КАСАЕТСЯ)

Для включения модели в базу данных программы Microcap используются файлы специальных форматов. Один из самых распространённых форматов - формат PSPICE с расширением - «.LIB». Такой текстовый файл может быть прочитан и отредактирован любым текстовым редактором и средствами Microcap. Для открытия файла в среде Microcap используется меню Open

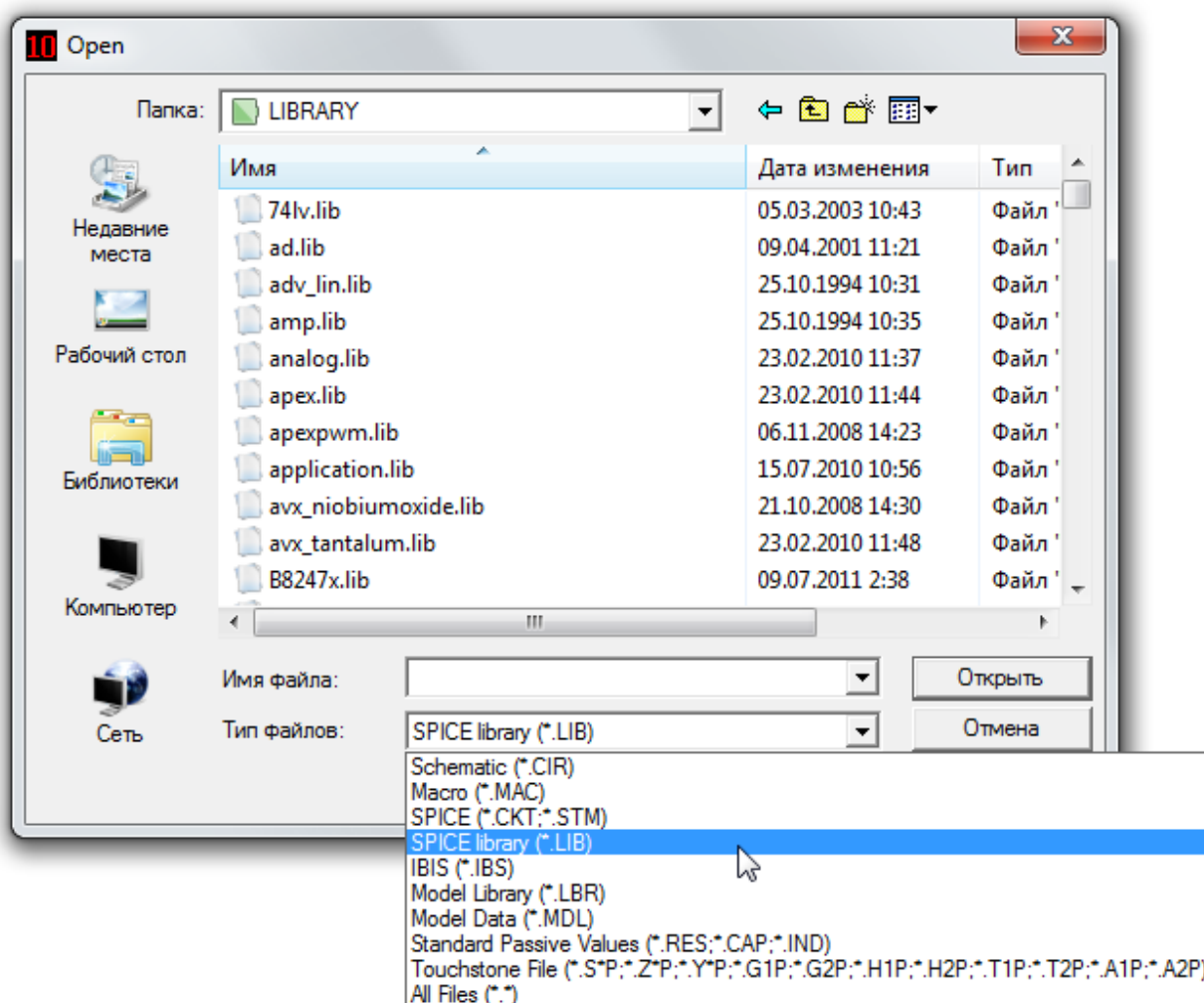


Рисунок 24

Строка в файле, где в первой позиции расположен символ звездочка «*» означает, что это строка комментариев и не принимается в расчёт для описания модели. Первая позиция строки со символом точка «.» означает начало описания модели. Первой в этой строке идёт служебная директива «.model» и указание на имя модели. После имени модели идёт символ «D», указывающий на то, что это модель диода. В скобках идёт

описание параметров: параметр и его значение. Символ «+» в первой позиции следующей строки означает продолжение предыдущей.

Вид фрагмента текстового файла с описанием модели диода в простом текстовом редакторе и текстовом редакторе Мисросар показан на рисунке

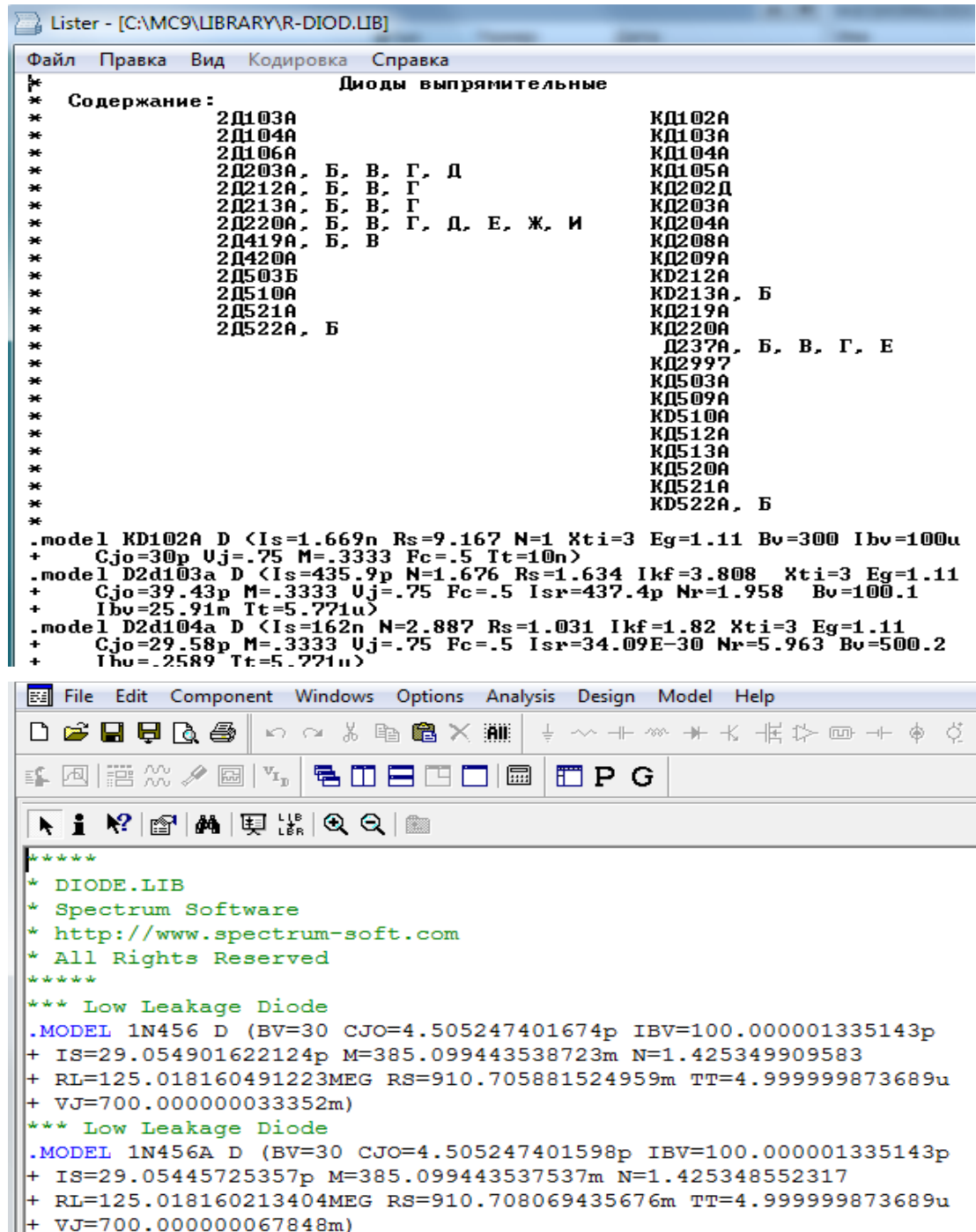


Рисунок 25

Если в описание модели будут отсутствовать какие-либо параметры, то программа Мисросар сама дополнит модель значением этого параметра по «умолчанию». Поэтому даже если описание будет содержать только статические параметры, то модель считается рабочей и будет воспринята программой.

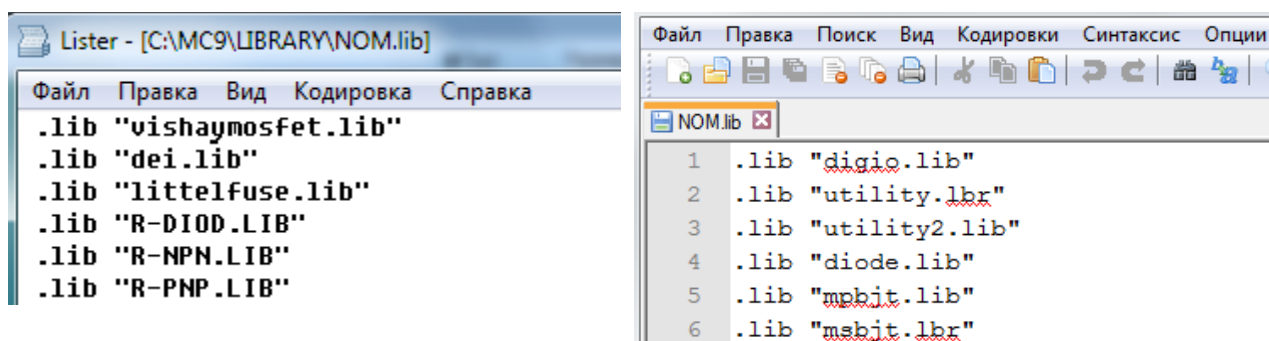


Рисунок 26

Далее модель должна быть подсоединена к базе данных программы. В Microcap это осуществляется помещением файла в папку «NOM.lib». Если файл расположен в папке NOM.lib, то указывается только имя файла, если же файл расположен в другом месте, то прописывается полный путь до файла. Этого достаточно для начала работы с моделью.

Существует возможность работать в Microcap с моделью прибора, не включая ее в «NOM.lib», а используя следующий приём: описание модели конкретного диода вставляется на закладку Text главного окна Microcap, после чего модель диода становится доступной для использования в программе Microcap (но только при использовании этого файла описания схемы).

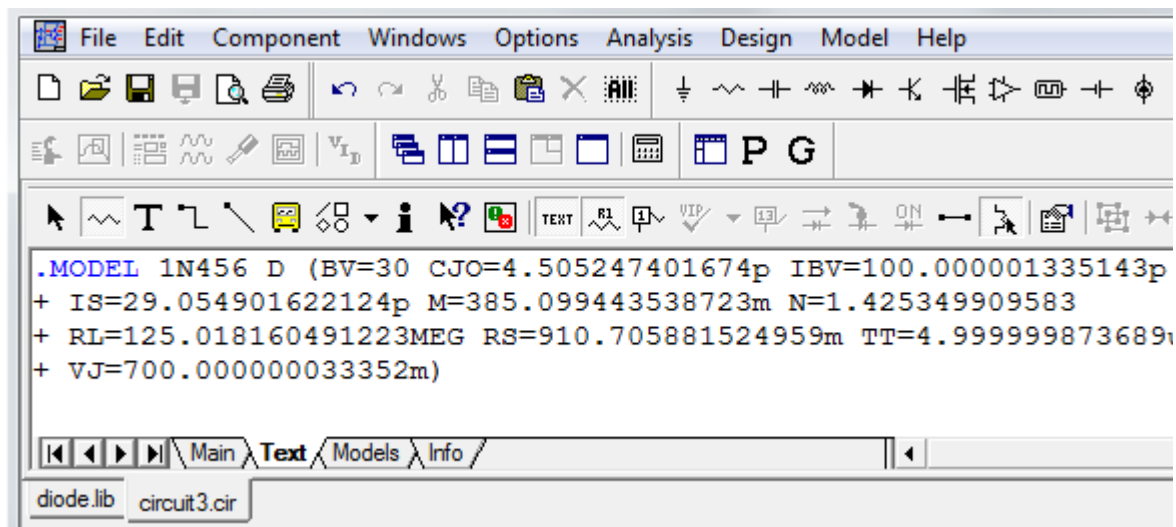


Рисунок 27

На закладке Text можно указать ссылку на библиотеку рис.37. Такой приём позволит иметь доступ ко всем элементам библиотеки, но только при использовании этого файла описания схемы.

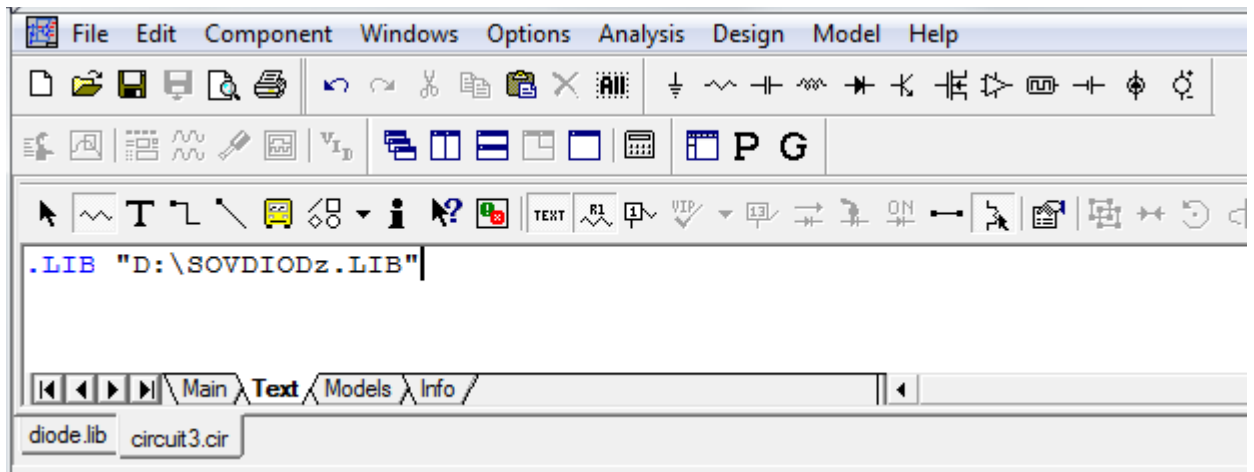


Рисунок 28

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

В отчете следует привести цель и задачи работы, краткую методику проведения экспериментов, как при моделировании, так и при работе на физическом стенде.

Экспериментальные прямые ветви ВАХ для диодов приводятся как с линейным масштабом для напряжения и тока, так и с полулогарифмическим (линейный для напряжения и логарифмический для тока). Построение экспериментальных ВАХ и определение по ним параметров диода, с помощью которых строятся его эквивалентные схемы, рекомендуется проводить с использованием математического пакета MCAD. Получение ВФХ желательно снабдить пояснением работы MCAD в режиме аналитических вычислений. Выбор методов численного решения остается за студентом, желательно этот выбор пояснить.

Проверка адекватности результатов построения модели осуществляется по сравнению ВАХ модельной и экспериментальной. К параметрам модели диода динамическим (барьерная и диффузионная компоненты) особых требований по точности не предъявляется.

В отчёте должно присутствовать содержимое файлов библиотеки созданных моделей диода в формате *.LIB.

В общем случае последовательность действий, при формировании отчёта по практикуму должно соответствовать диаграмме:



Рисунок 29

ЛИТЕРАТУРА. ОСНОВНАЯ.

1. Загидуллин Р.Ш. Лабораторный практикум по курсам «Дополнительные главы Информатики», «Основы Электроники». Часть 1. 1 Введение в работу с программой MCAD. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. – 73 с. ил
2. Марченко А. Л. Основы электроники. Учебное пособие для вузов/А. Л. Марченко. — М.: ДМК Пресс. 2008. — 296 с. ил. Табл. 25. Ил. 252. Библиогр. 26 назв. ISBN 978-5-94074-432-0
1. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. -617 с, ил.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2-х томах. Пер. с англ.-М.: Мир, 1983. - т. 1. 598 с: ил.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2-х томах. Пер. с англ.-М.: Мир, 1983. -т.2. 590 с: ил.
4. Гурский Д. А. Турбина Е. С. Вычисления а MCAD 12. — СПб.: Питер. 2006. — 544 с.: ил. ISBN 5-469-00639-6
5. Хернитер Марк К. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. (Пер. с англ.) / Пер. с англ. Осипов А.И. - М.; Издательский дом ДМК-пресс, 2006. 488 с: ил..