

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»

Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

Домашнее задание №1

по дисциплине

«Электроника»

Выполнили студенты группы РЛ-41

Филимонов С.В.

Мухин Г. А.

Сиятелев А.Ю.

Фамилия И.О.

Проверил проф. Крайний В.И.

Оценка в баллах _____

Москва, 2022

СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ И АББРЕВИАТУР

ВАХ - Вольт амперная характеристика

МС - Micro-CAP12



Оглавление

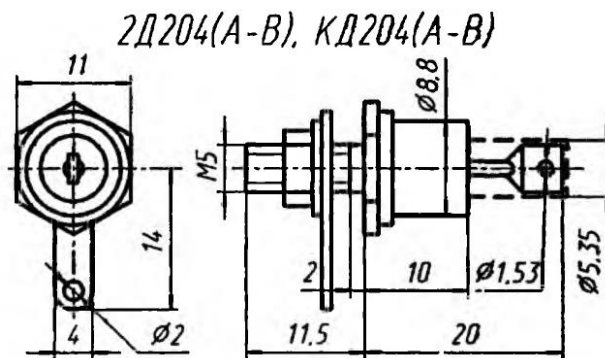
СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ И АББРЕВИАТУР.....	
ДИОД.....	
1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ.....	
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ.....	
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ.....	
4. ОПРЕДЕЛИТЬ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ДИОДА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	

ДИОД

KD204B

2Д204А, 2Д204Б, 2Д204В, КД204А, КД204Б, КД204В

Диоды кремниевые, диффузионные. Предназначены для преобразования переменного напряжения частотой до 50 кГц. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с жесткими выводами. Тип диода и схема соединения электродов с выводами приводятся на корпусе. Масса диода не более 6 г, с комплектующими деталями не более 7,5 г.



Электрические параметры

Постоянное прямое напряжение

при $I_{пр} = 0,6$ А, не более:

$T = +25$ °С 1,4 В

$T = -60$ °С 1,6 В

Импульсное прямое напряжение при

$I_{пр, и} = 2$ А, $I_{пр, ср} = 30$ мА, $f = 1500$ Гц,

$t_{и} = 10$ мкс, $t_{ф} \leq 4$ мкс для 2Д204А, 2Д204Б,

2Д204В, не более 2 В

Постоянный обратный ток при $U_{обр} = U_{обр, макс}$,
не более:

$T = +25$ и -60 °С:

2Д204А, КД204А 150 мкА

2Д204Б, КД204Б 100 мкА

2Д204В, КД204В 50 мкА

$T = +85$ °С:

КД204А 2 мА

КД204Б 1 мА

КД204В 0,5 мА

$T = +125$ °С:

2Д204А 2 мА

2Д204Б 1 мА

2Д204В 0,5 мА

Время обратного восстановления при

$U_{обр, и} = 30$ В, $I_{пр, и} = 1$ А, $t_{и} = 10$ мкс,

$t_{ф} \leq 0,5$ мкс, не более 1,5 мкс

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

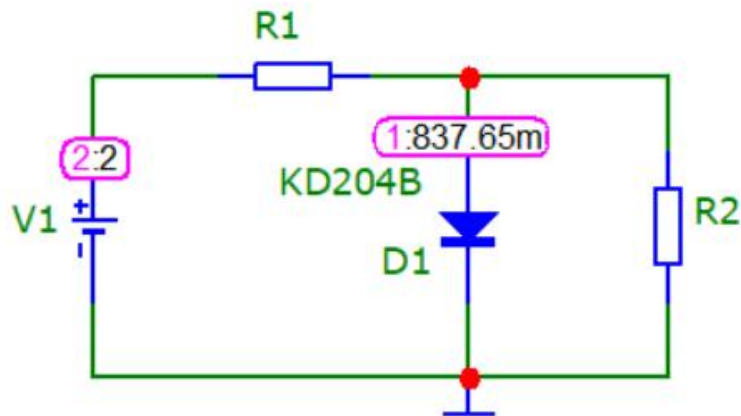


Рис. 1 Схема

The screenshot shows the 'Diode' component editor window. The 'Name' field is set to 'MODEL'. The 'Value' field is set to 'KD204B'. The 'Display' section has checkboxes for 'Pin Markers', 'Pin Names', 'Pin Numbers', 'Current', 'Power', and 'Condition', all of which are checked. The 'Shape' section has 'Border' and 'Fill' options, both set to 'D'. The 'PART=D1' section shows the following parameters: VALUE=, MODEL=KD204B, SMOKE=, COST=, POWER=, SHAPEGROUP=Default, and PACKAGE=DO-35. The 'Enabled' checkbox is checked, and the 'Columns' are set to 3. The 'Help Bar' is checked. The 'Show Data on Exit' checkbox is unchecked. The 'Source: Local page 'Models'' section shows a list of diode models, with 'KD204B' selected. The 'Parameters' section contains the following values:

Parameter	Value
LEVEL	1
CJO	0
IBV	100p
IS	10f
M	500m
NBVL	1
RS	0
T_REL_GLOBAL	undefined
TBV2	0
TRS2	0
XTI	3
AF	1
EG	1.11
IBVL	0
ISR	0
N	1
NR	2
T_ABS	undefined
T_REL_LOCAL	undefined
TIKF	0
TT	0
BV	0
FC	500m
IKF	0
KF	0
NBV	1
RL	0
T_MEASURED	undefined
TBV1	0
TRS1	0
VJ	1

Controls the display of pin markers.

Рис.2 Описание диода в программе МС

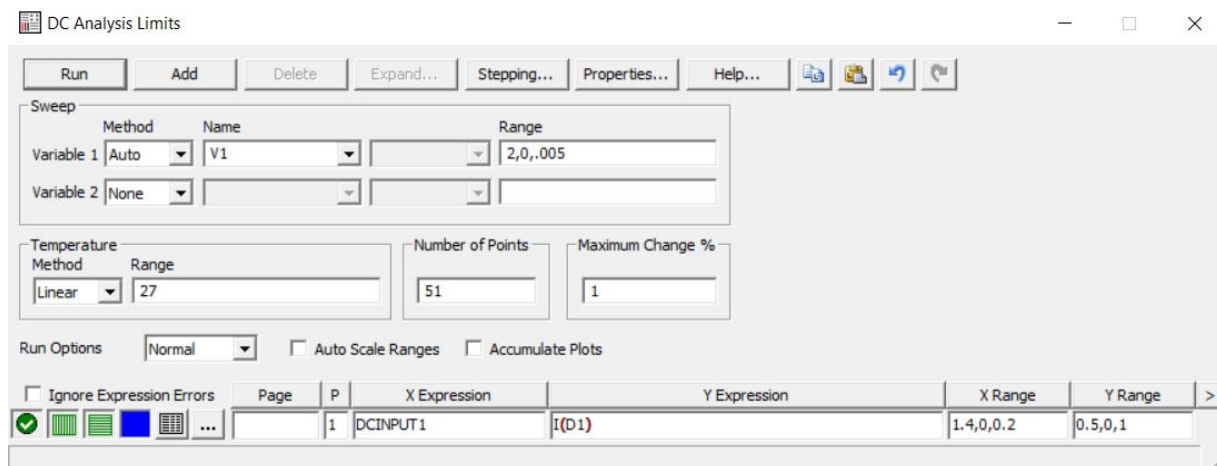


Рис.3 DC Analysis Limits

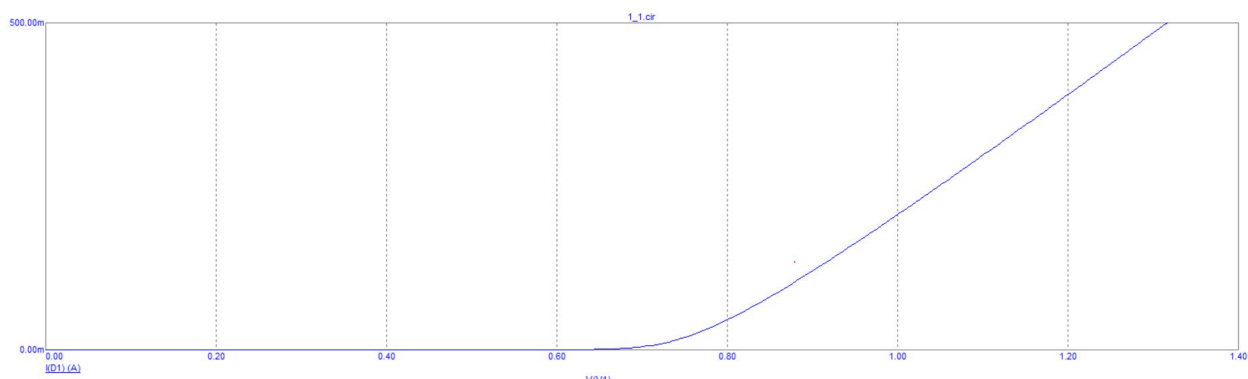
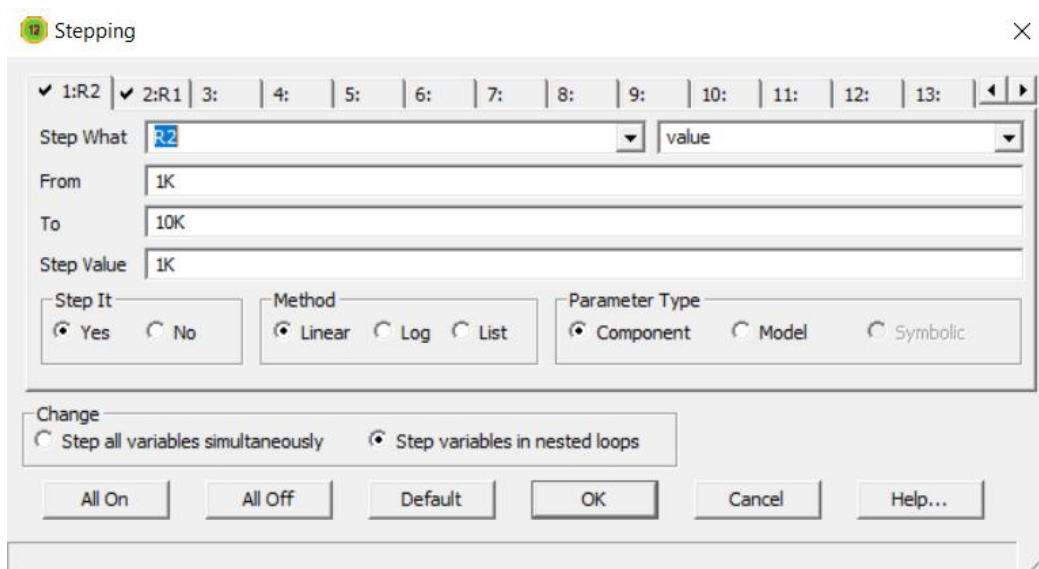


Рис.4 ВАХ прямой ветви

Проводим многовариантный анализ (stepping) для $R_2 = 1\text{K}..10\text{K}$, $R_1 = 1..10\text{ Ом}$.



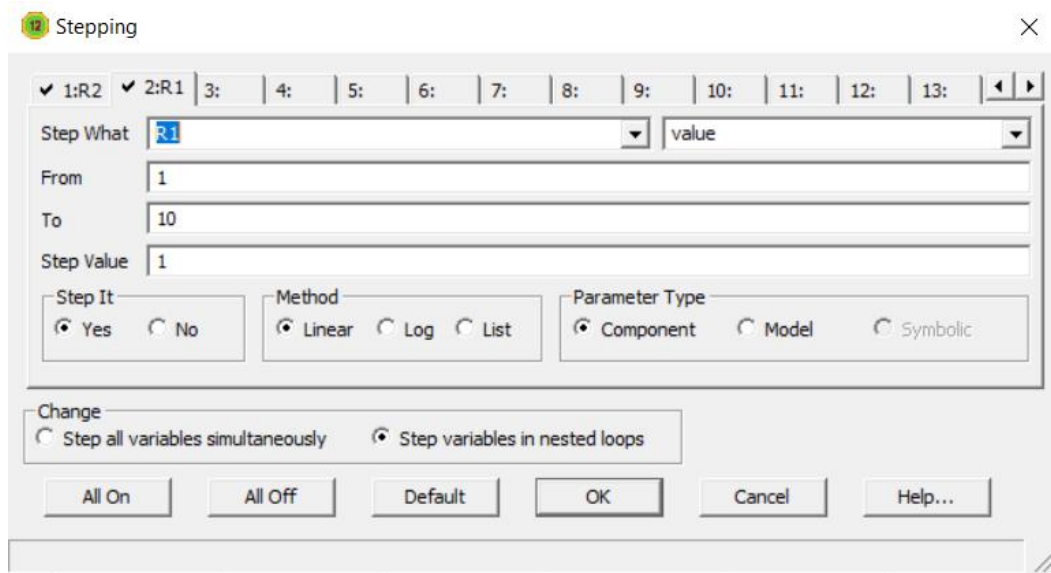


Рис.5 Настройка Stepping

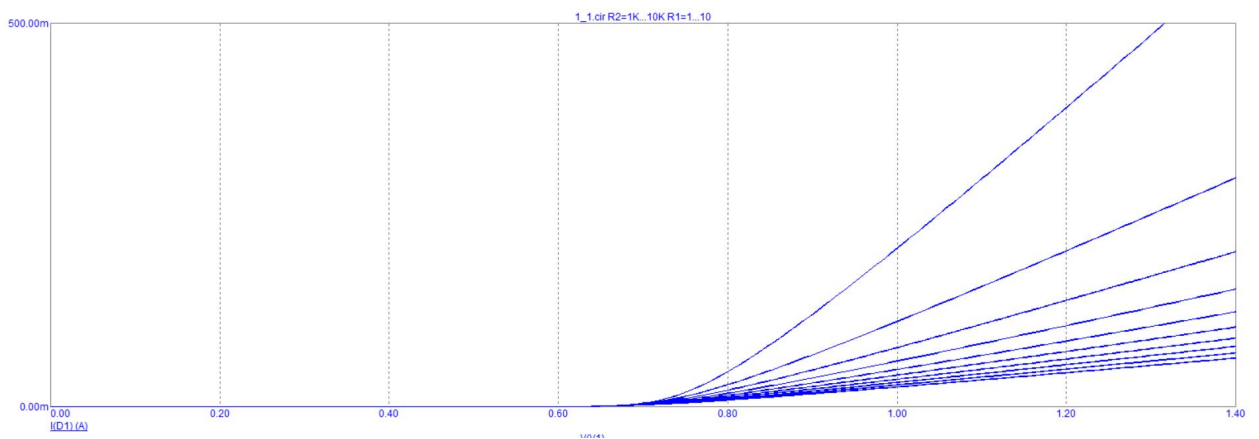


Рис. 6 График ВАХ

Для $R1=1..10$ Ом. При увеличении величины сопротивления $R1$ ВАХ смещается из-за увеличения падения напряжения на $R1$.

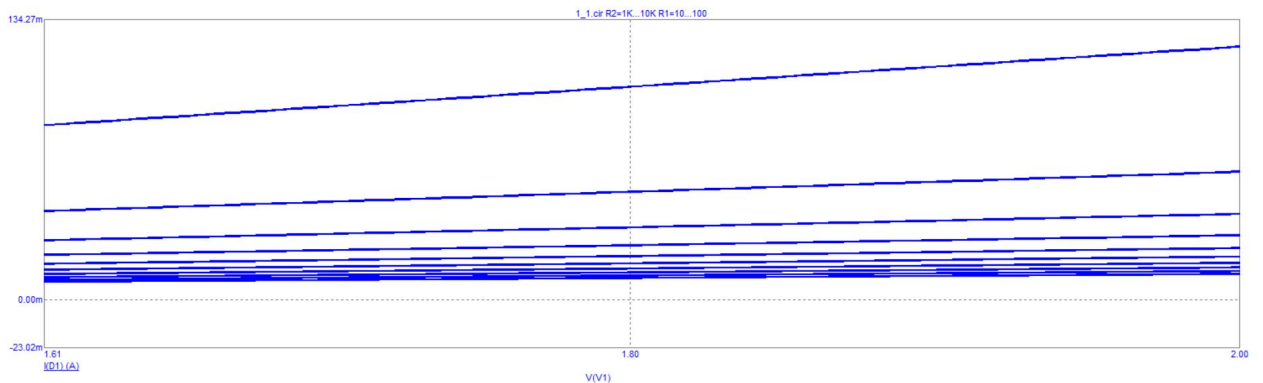


Рис. 7 $R1$ увеличивается

Графики расположены очень близко друг к другу поскольку сопротивления R_2 и диод включены параллельно и $R_{\text{диода}} \ll R_2$.

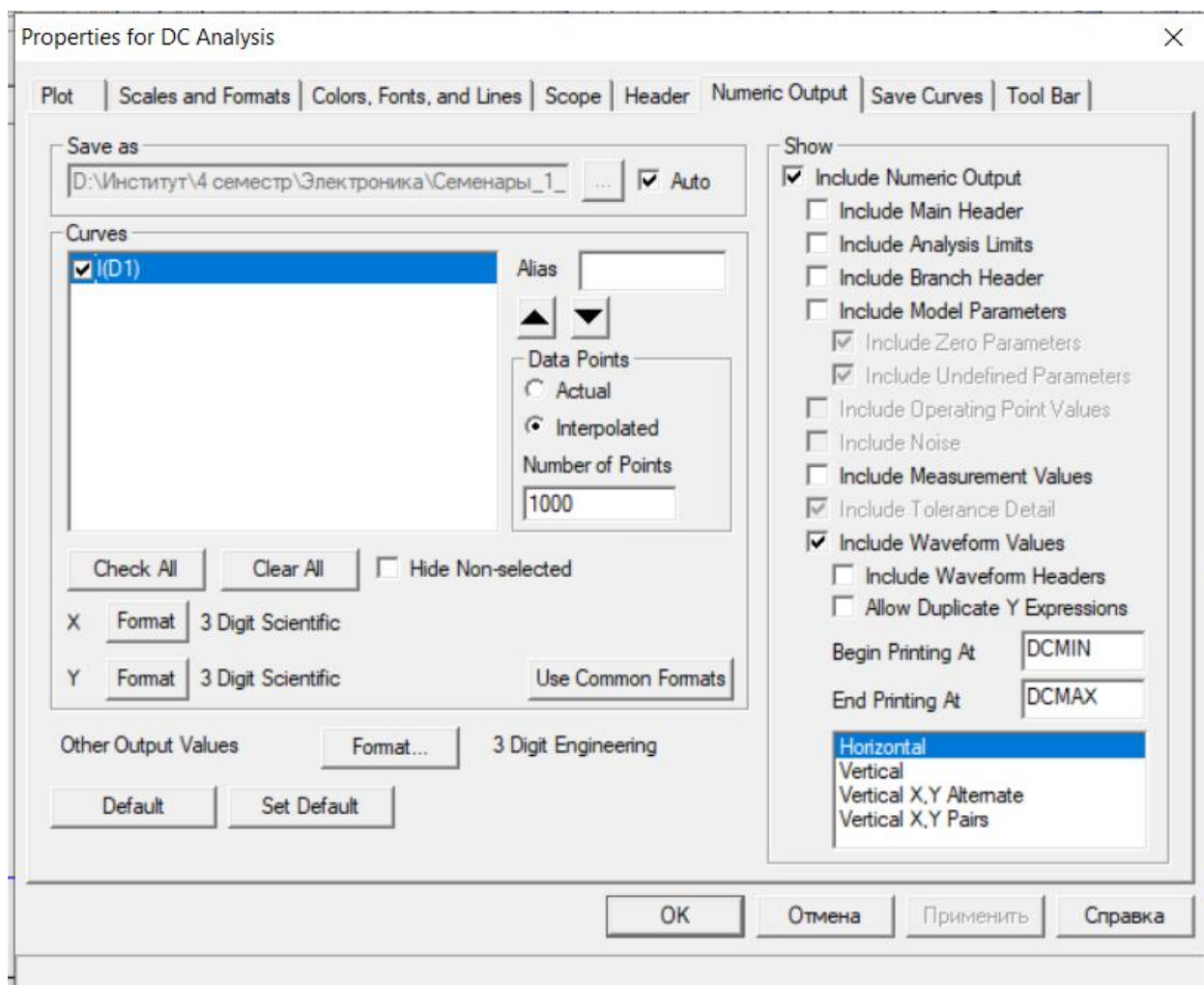


Рис. 8 Настройка для сохранения точек.

V (V1)	I (D1) (A)
0.000E+00	1.000E-50
2.002E-03	2.855E-15
4.004E-03	5.711E-15
6.006E-03	8.657E-15
8.008E-03	1.169E-14
1.001E-02	1.473E-14
1.201E-02	1.799E-14
1.401E-02	2.124E-14
1.602E-02	2.465E-14
1.802E-02	2.817E-14
2.002E-02	3.170E-14
2.202E-02	3.555E-14
2.402E-02	3.939E-14
2.603E-02	4.346E-14
2.803E-02	4.771E-14
3.003E-02	5.195E-14
3.203E-02	5.667E-14
3.403E-02	6.139E-14
3.604E-02	6.644E-14
3.804E-02	7.174E-14
4.004E-02	7.705E-14
4.204E-02	8.305E-14
4.404E-02	8.906E-14
4.605E-02	9.554E-14
4.805E-02	1.024E-13

Рис.9 Точки

$$Rb = 1.106$$

$$Is = 1.331 \cdot 10^{-8}$$

$$NFt = 0.044$$

$$F(x) := x \cdot Rb + \ln \left[\frac{(IS + x)}{IS} \right] \cdot NFt.$$

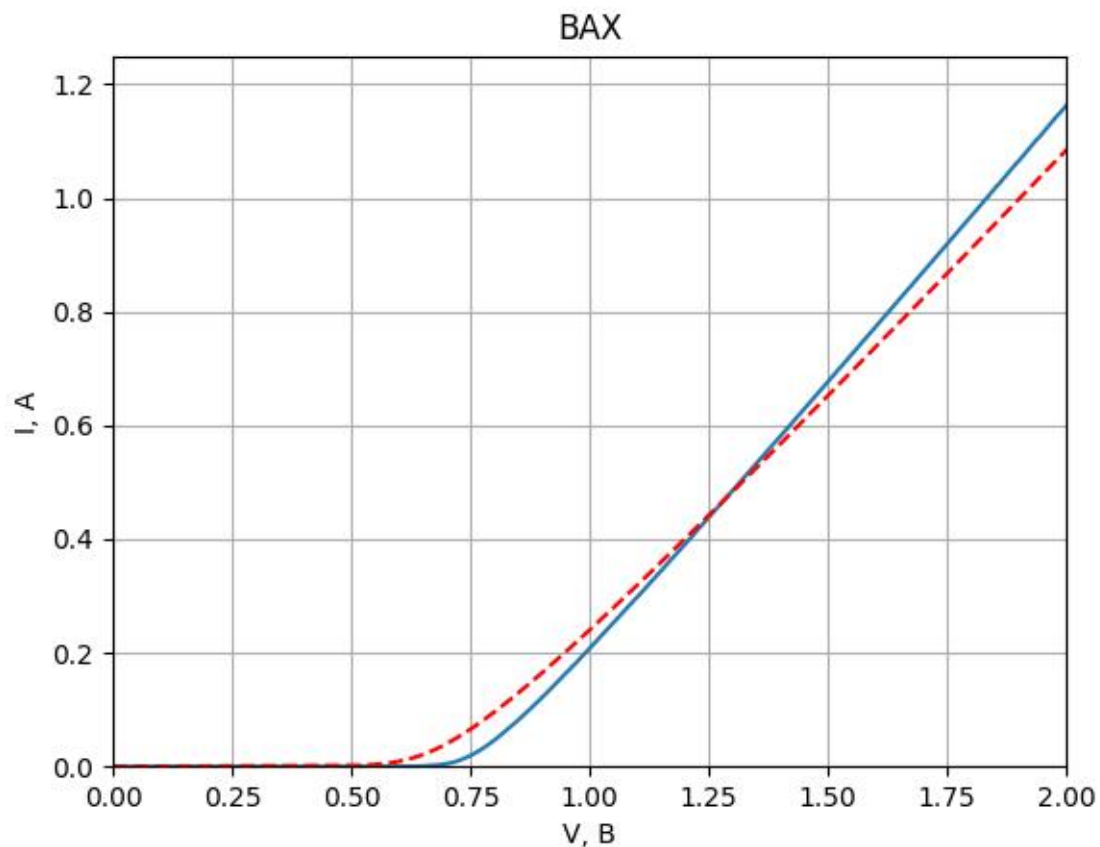


Рис. 10 Вах теоретический
График обратной ветви ВАХ.

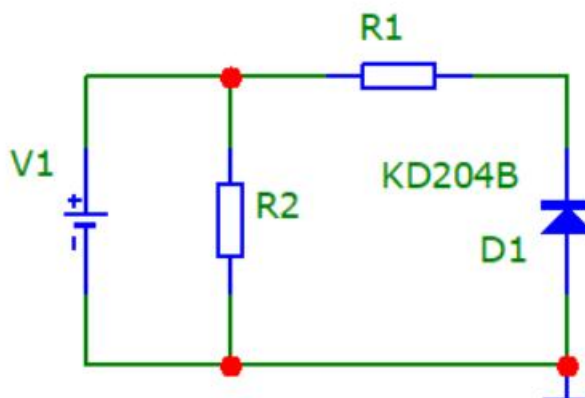


Рис. 1 Схема

Строим обратную ветвь ВАХ диода. Диалоговое окно задания параметров для построения ВАХ следующее:

DC Analysis Limits

Run Add Delete Expand... Stepping... Properties... Help...

Sweep

Variable	Method	Name	Range
Variable 1	Auto	V1	5,0,0.01
Variable 2	None		

Temperature

Method	Range
Linear	27

Number of Points: 51

Maximum Change %: 1

Run Options: Normal ☒ Auto Scale Ranges ☐ Accumulate Plots

☐ Ignore Expression Errors

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range	>
<input checked="" type="checkbox"/>	1	DCINPUT1	I(D1)	5,0,1	1e-11,-1.5e-11,5	

Defines the range of the Y-axis. Format is <high>[, <low>[, <grid spacing>[, <bold grid spacing>]][, <comment>].

Рис. 2 Настройка пределов

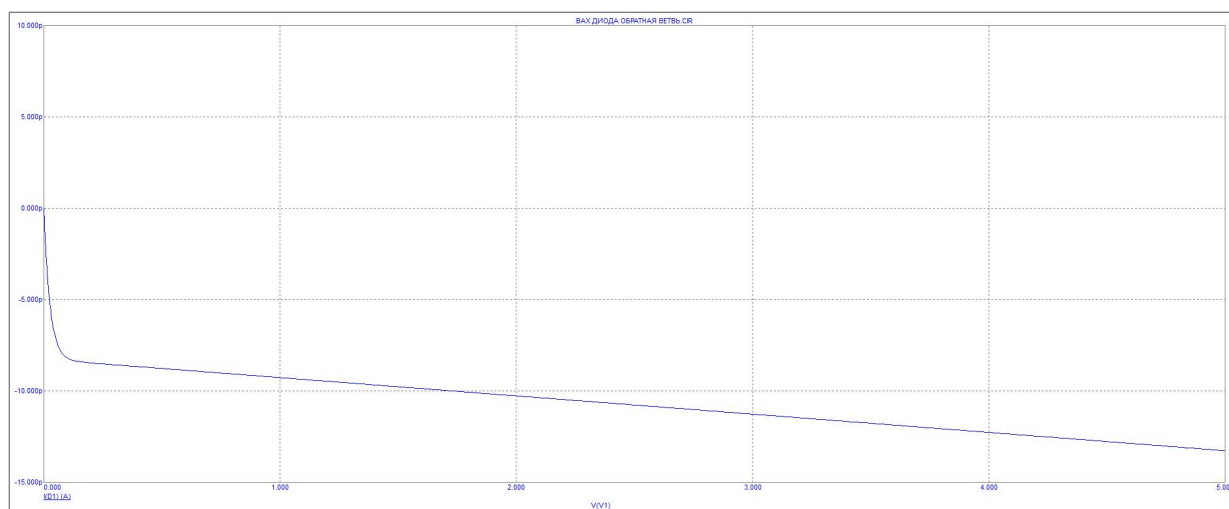


Рис. 3 График обратного ВАХ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

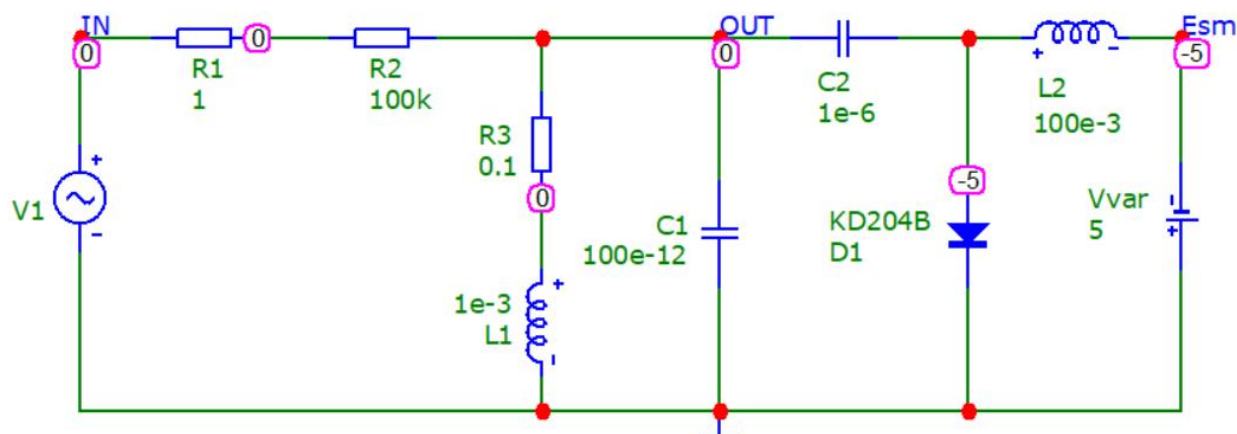


Рис. 1 Схема

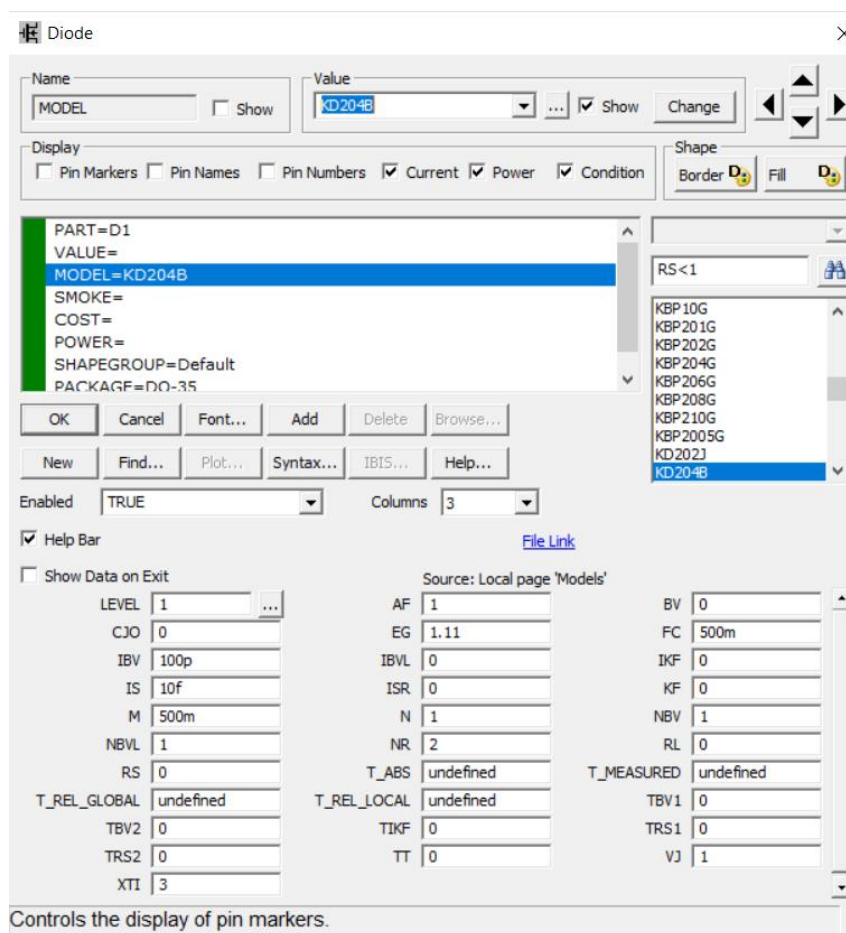


Рис.2 Описание диода в программе МС

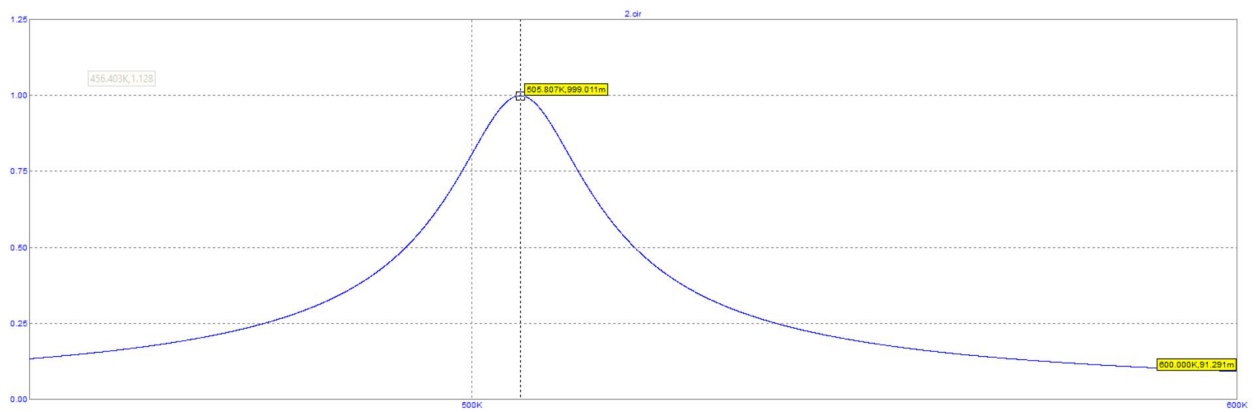


Рис.3 ВФХ

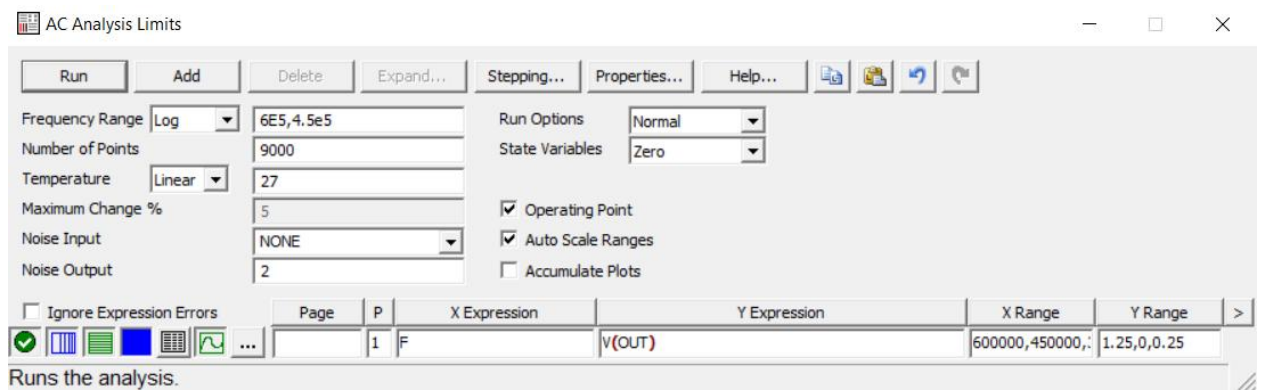
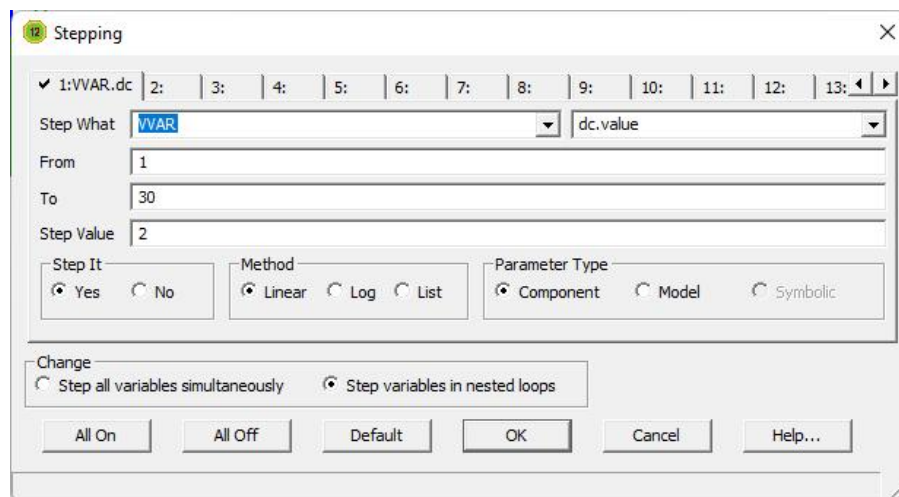
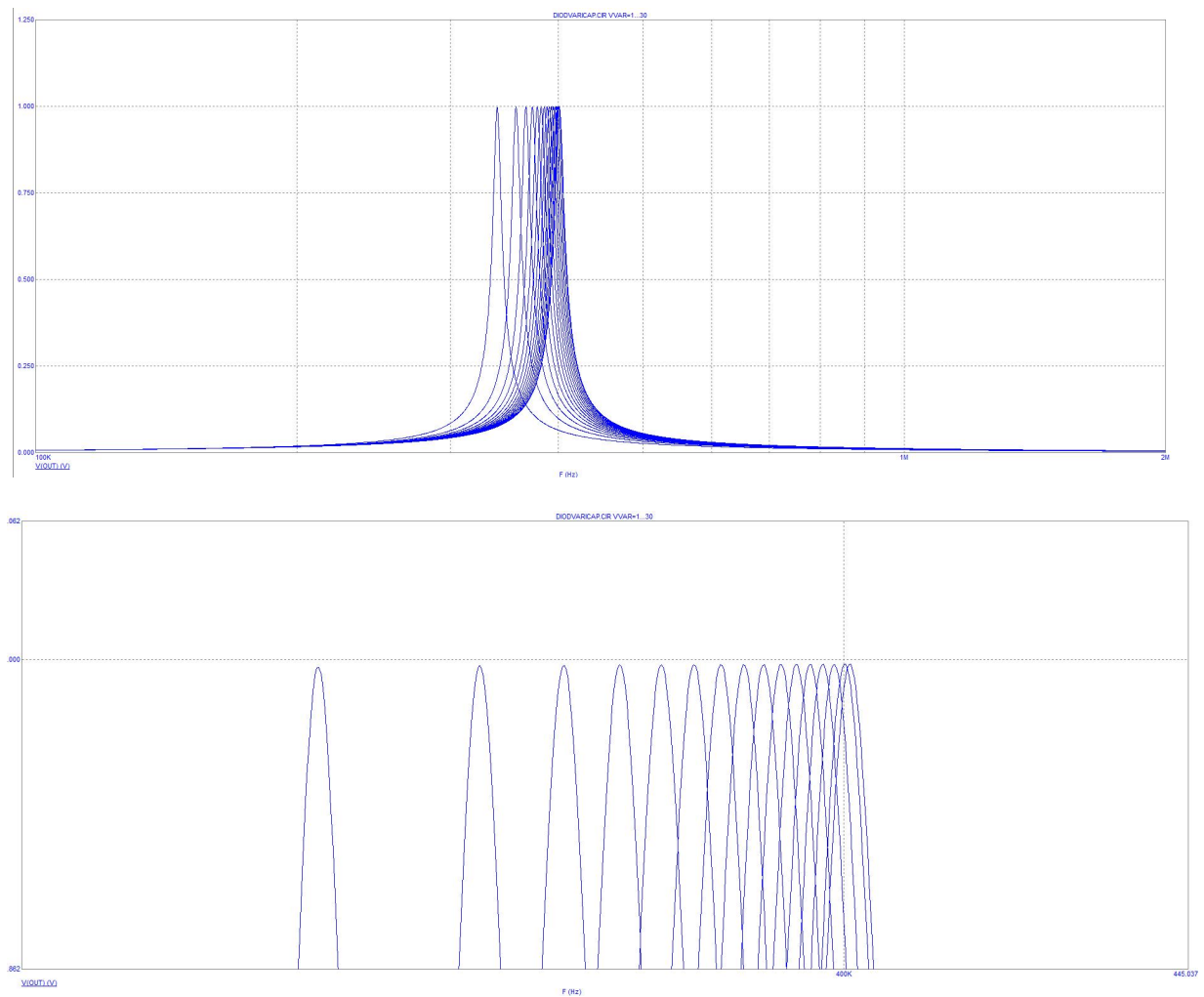


Рис.4 Настройки графика в МС

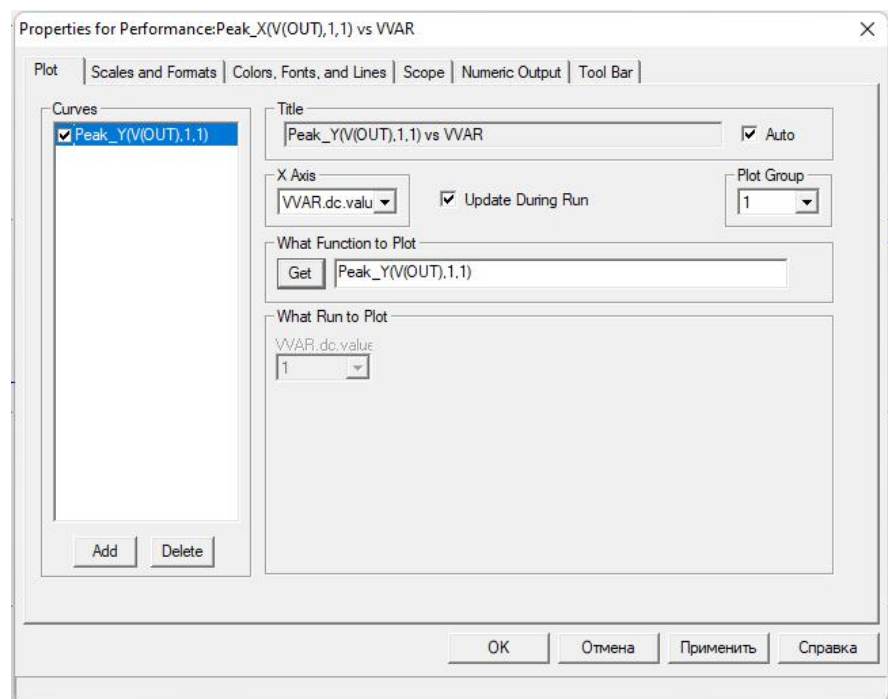
Stepping:



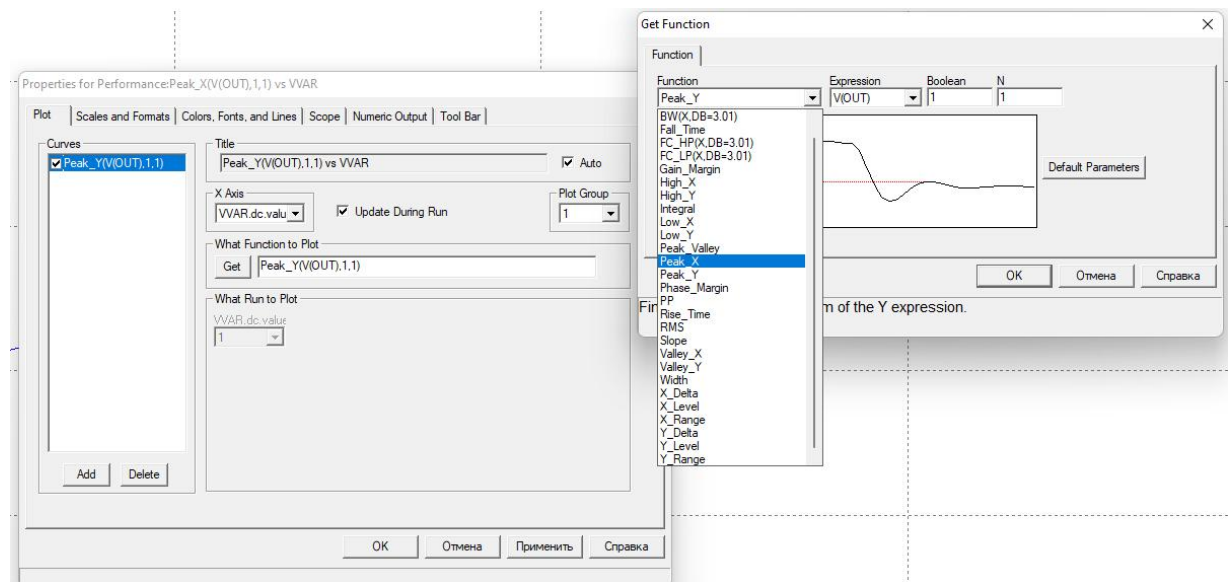
Проведя анализ, получим резонансные кривые:



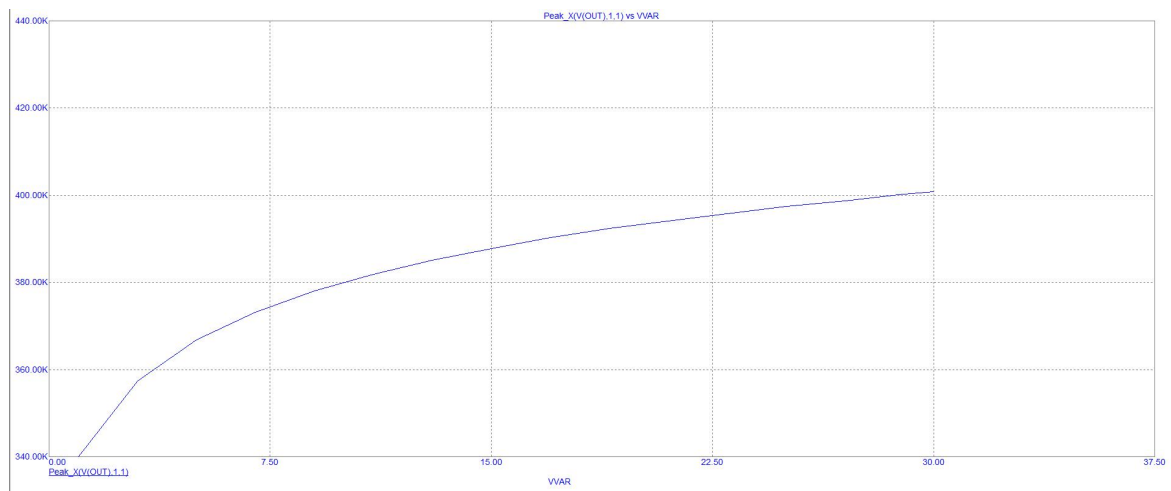
Для построения зависимости резонансной частоты как функцию напряжения источника Vvar выберем AC→Performance window→Add performance window.



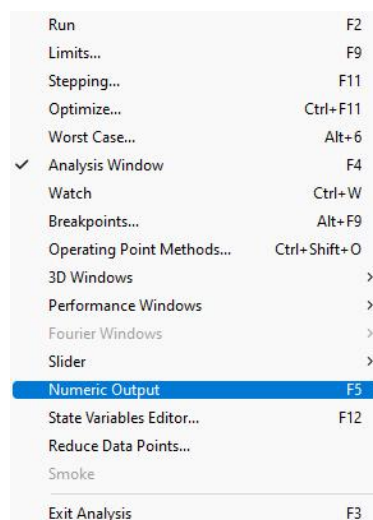
Нажмем Get и выберем в меню Peak_X:



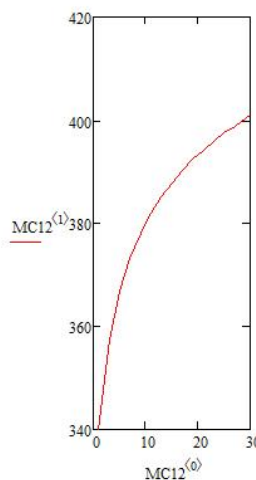
Получаем следующий график:



Вывод данных:



MC12 = READPRN("DIODVARICAP Peak_X(V(OUT),1,1) vs VVAR.ANO")

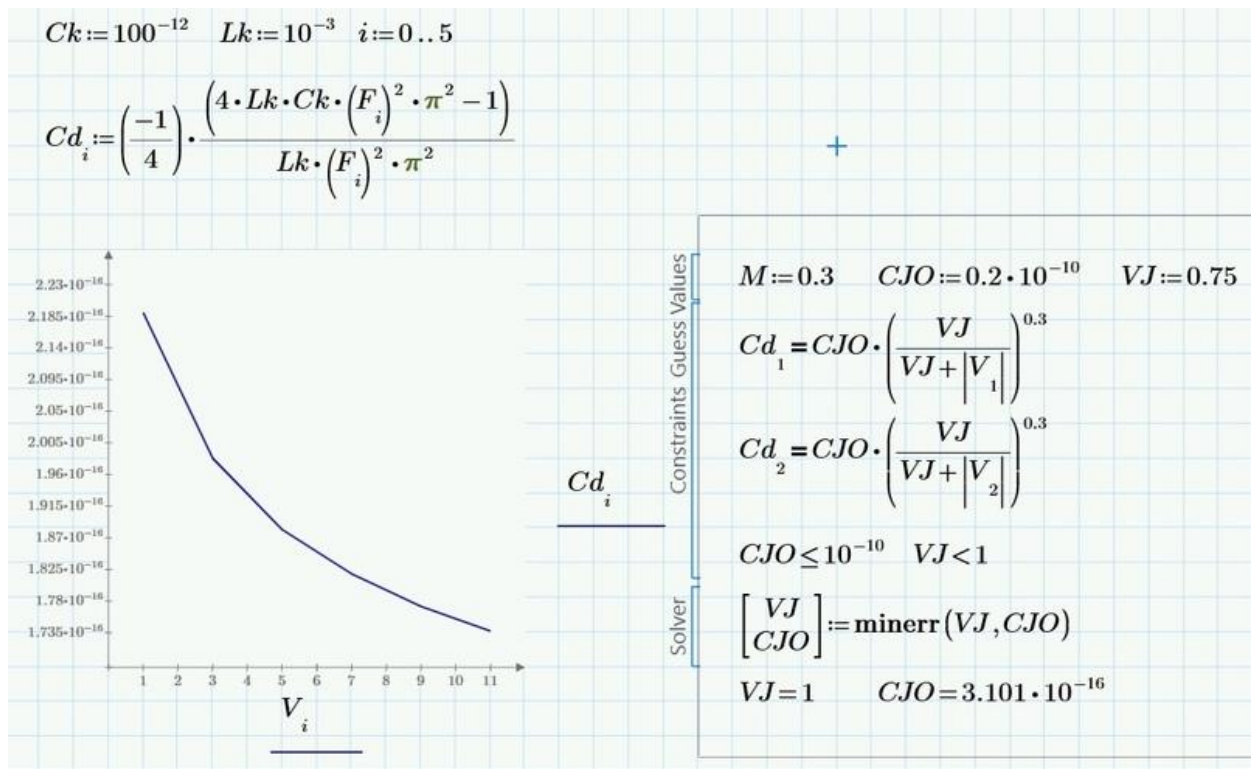


MC12 =

	0	1
4	9	378.064
5	11	381.865
6	13	385.032
7	15	387.776
8	17	390.31
9	19	392.421
10	21	394.11
11	23	395.8
12	25	397.489
13	27	398.755
14	29	400.233
15	30	...

длина(MC12⁽¹⁾) = 16

Далее рассчитываем емкость диода и строим график ее зависимости от обратного напряжения (вольт-фарадная характеристика):



ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы: исследование характеристик германиевого и кремниевого диодов, изучение методики измерения характеристик и расчет параметров математической модели диода по характеристикам.

Приборы и измерительные устройства: Мультиметр М3900, источник питания МАРС, Вольтметр В7-58/2, Резистор сопротивлением 100 кОм и 620 кОм, исследуемые диоды VD1 – ДЗ11А, VD2 – КД105, исследуемый стабилитрон VD3 – Д814А.

Параметры исследуемых элементов:

ДЗ11А:

Диод универсальный германиевый мезадиффузионный.

Постоянное прямое напряжение при $I_{пр}=10$ мА, не более 0,4 В.

Постоянный обратный ток - не более 100 мкА.

Общая ёмкость диода при $U_{обр}=5$ В , не более 3 пФ.

Предельный постоянный (средний) прямой ток 80 мА.

Предельное постоянное или импульсное обратное напряжение – 30 В.

КД105В:

Диод выпрямительный кремниевый диффузионный.

Среднее прямое напряжение при $I_{пр}=300$ мА - не более 1 В.

Средний обратный ток - не более 100 мкА.

Предельный средний прямой ток – 300 мА.

Предельное импульсное обратное напряжение – 600 В.

Примечания.

1. Указанные параметры даны для температуры 298 – 343 К.
2. Прямое напряжение указывается для предельного прямого тока, обратный ток – для предельного обратного напряжения (если не указано иного).

Стабилитрон:

Д814А:

Стабилитрон общего назначения кремниевый сплавной.

Номинальное напряжение стабилизации при $I_{пр}=5$ мА – 8 В.

Разброс напряжения стабилизации при $I_{пр}=5$ Ма – от 7,0 до 8,5 В

Температурный коэффициент напряжения стабилизации при температуре от 303 до 398 К не более 0,07 %/К

Дифференциальное сопротивление при $I_{пр}=5$ Ма - не более 6 Ом.

Постоянное прямое напряжение при $I_{пр}=50$ мА - не более 1 В.

Минимальный ток стабилизации – 3 мА.

Максимальный ток стабилизации 40 мА.

Предельный постоянный прямой ток – 100 мА.

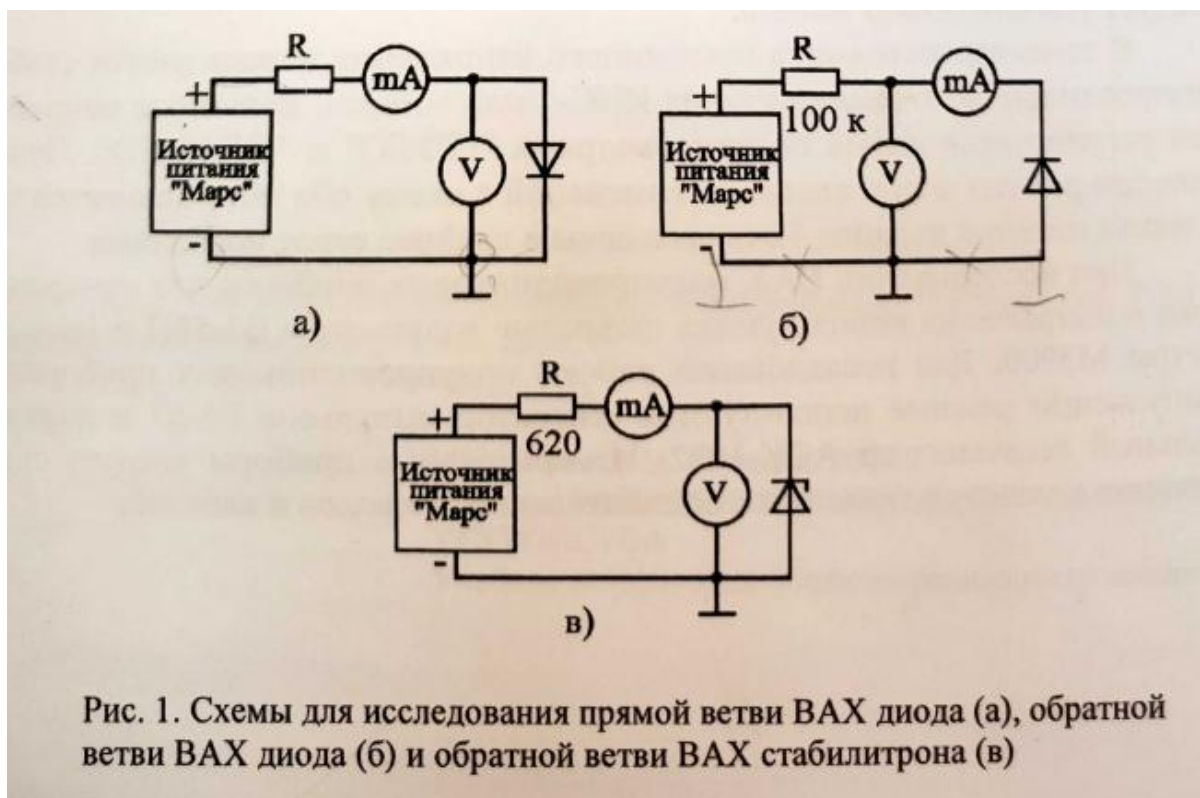


Рис. 1. Схемы для исследования прямой ветви ВАХ диода (а), обратной ветви ВАХ диода (б) и обратной ветви ВАХ стабилитрона (в)

Снимаем прямую ветвь ВАХ диодов VD1 и VD2.

Собираем схему для снятия характеристики; схему на лабораторной установке собрать в соответствии со схемой рис. 1, а. При снятии начального участка прямой ветви ВАХ (токи менее 150 мкА) последовательно с диодом включить резистор 100 кОм. Изменяя выходное напряжение источника питания, последовательно устанавливаем токи диода 50 мкА, 100 мкА, 500 мкА, 1 мА, 2 мА, 5 мА, 7 мА, 10 мА и измерить соответствующие им напряжение на диоде. Для получения токов 500 мкА и больше заменить резистор 100 кОм на 620 Ом, предварительно отключив источник питания (либо уменьшив его выходное напряжение до нуля).

I, mA	U, V
0,05	0,05

0,1	0,10
0,5	0,16
1	0,19
2	0,22
5	0,27
7	0,29
10	0,32

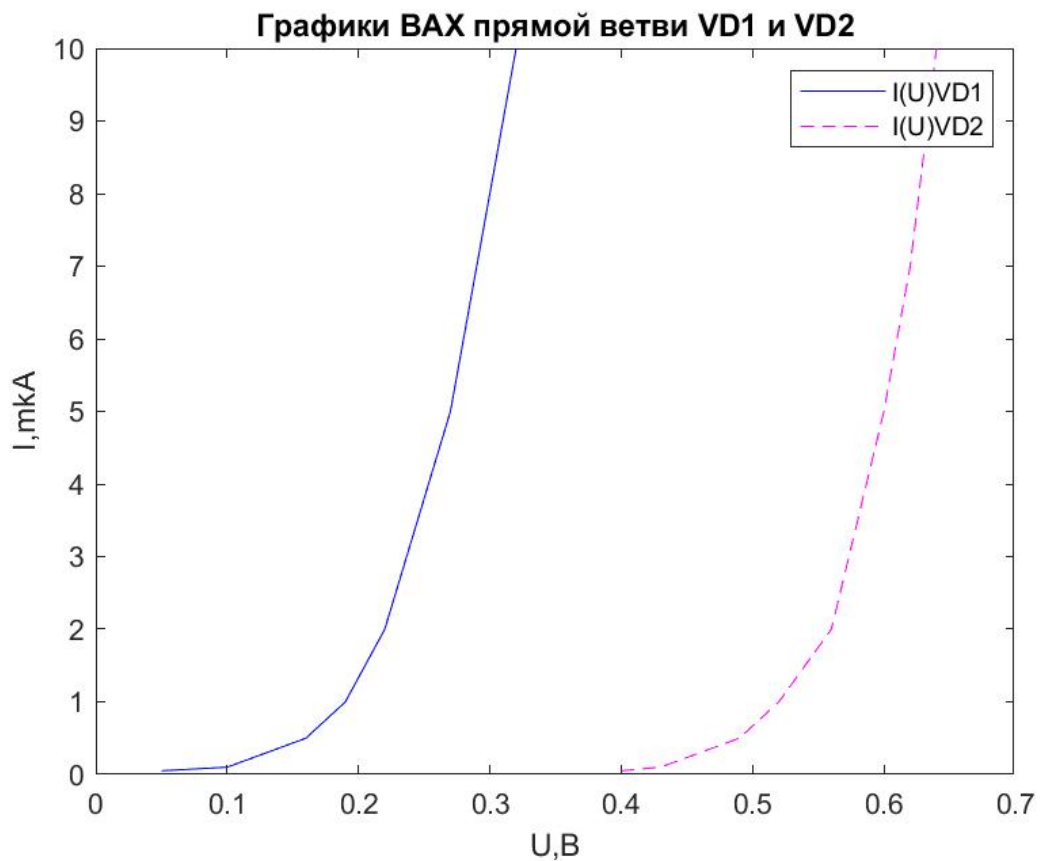
Таблица 1 – Результаты снятия ВАХ для прямой ветви VD1.

Аналогично снять прямую ветвь ВАХ диода VD2.

По результатам измерений построить графики прямых ветвей ВАХ диодов VD1 и VD2 в одной системе координат.

I, mA	U, B
0,05	0,4
0,1	0,43
0,5	0,49
1	0,52
2	0,56
5	0,6
7	0,62
10	0,64

Таблица 2 – Результаты снятия ВАХ для прямой ветви VD2.



Снимаем обратную ветвь ВАХ диодов VD1 и VD2.

Собираем схему снятия обратной ветви ВАХ с диодом VD1 (рис. 1, б). Последовательно с диодом включаем резистор 100 кОм. Изменяя выходное напряжение источника напряжения, последовательно устанавливаем напряжения на диоде 0,5 В, 1 В, 2 В, 5 В, 7 В, 10 В и измеряем соответствующие им токи диода.

U,V	I,mkA
-0,5	-6,4
-1	-7,27
-2	-7,88
-5	-9,04
-7	-9,67
-10	-10,47

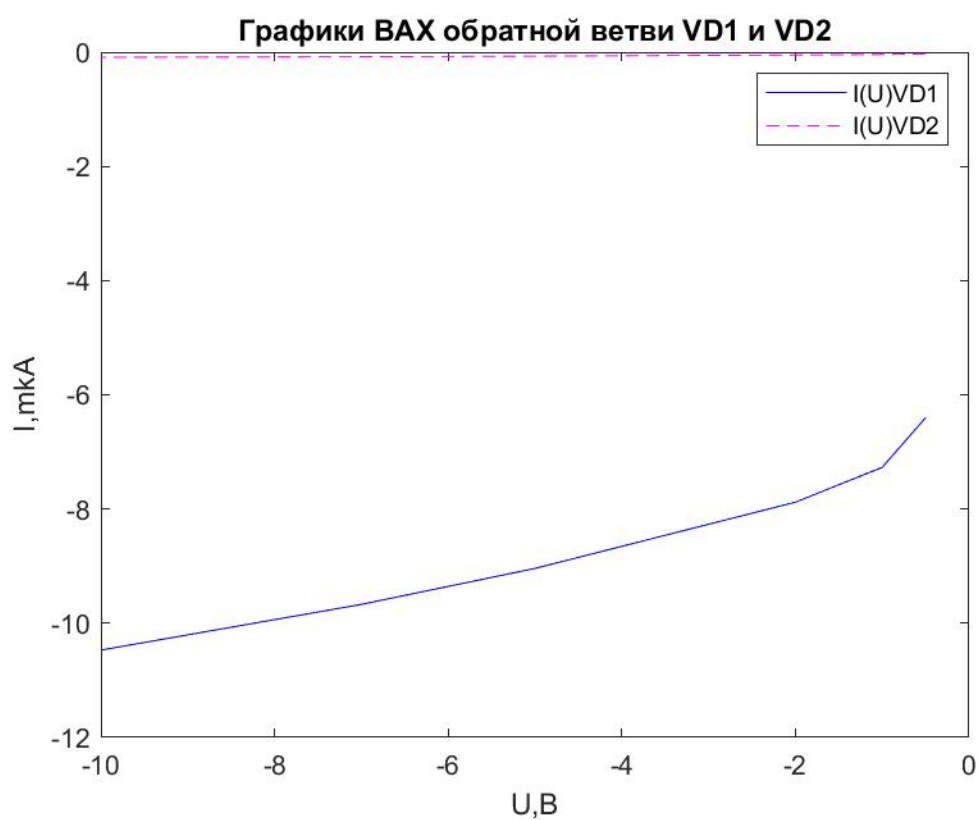
Таблица 3 – Результаты снятия ВАХ для обратной ветви VD1.

Аналогично снимаем обратную ветвь диода VD2. По результатам измерений строим графики обратных ветвей диодов VD1 и VD2 в одной системе координат.

U,B	I,mkA
-0,5	-0,03
-1	-0,04
-2	-0,05
-5	-0,07
-7	-0,08
-10	-0,09

Таблица 4 - Результаты снятия ВАХ для обратной ветви VD2.

Построим график:

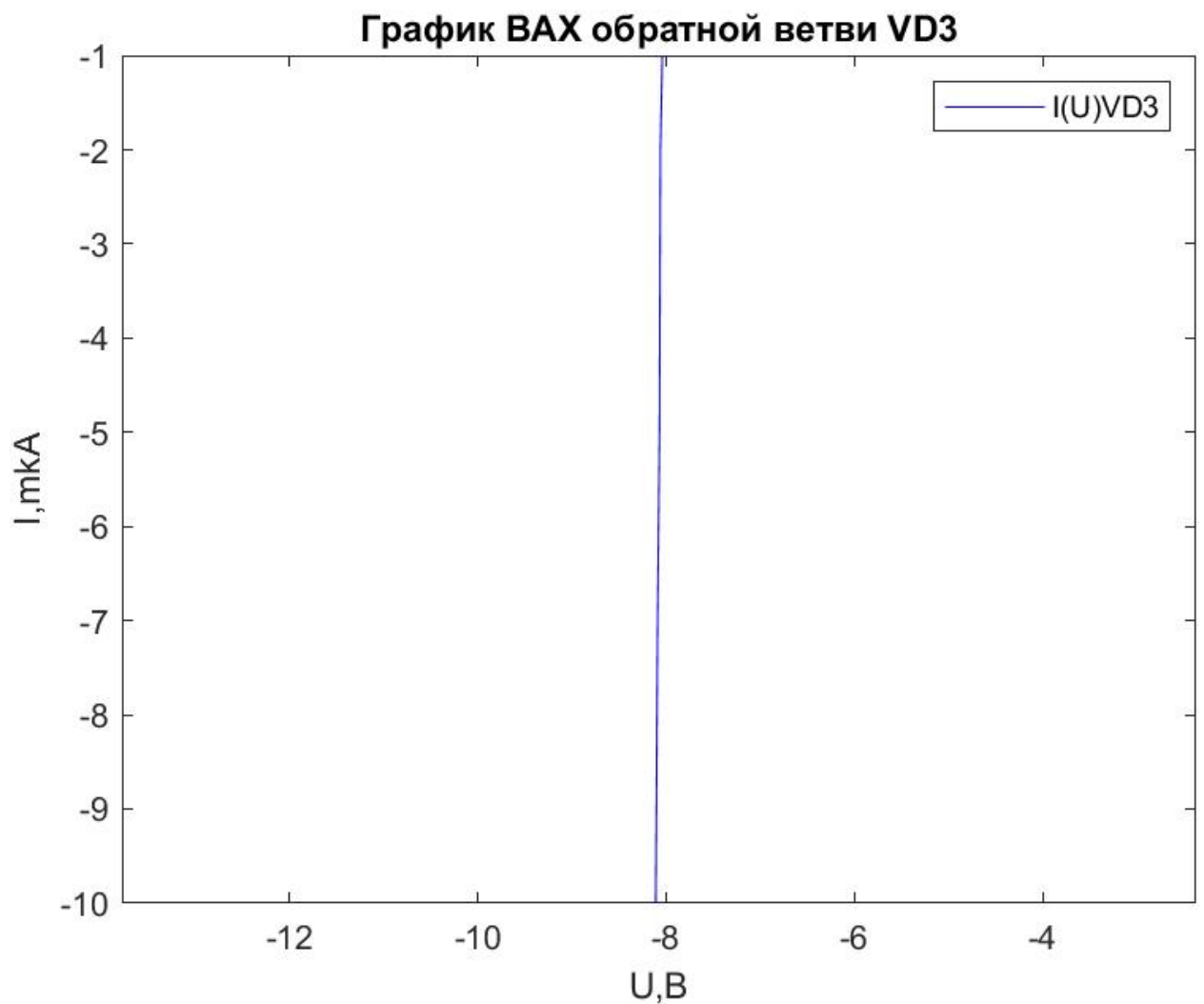


Снимем обратную ветвь ВАХ стабилитрона VD3.

Соберем схему снятия обратной ветви ВАХ стабилитрона VD3 (рис. 1, в). Последовательно со стабилитроном включим резистор 620 Ом. Медленно увеличивая выходное напряжение источника питания, добьемся увеличения обратного тока стабилитрона до 0,5 мА (стабилитрон входит в режим электрического пробоя) и измерим напряжение на стабилитроне. Далее, изменяя выходное напряжение источника питания, последовательно установим токи стабилитрона 1 мА, 2 мА, 5 мА, 7 мА, 10 мА и измерим соответствующие им напряжения на стабилитроне. По результатам измерений построим график обратной ветви ВАХ стабилитрона.

I, mA	U, В
-1	-8,04
-2	-8,06
-5	-8,07
-7	-8,09
-10	-8,11

Таблица 5 – Результаты снятия ВАХ для обратной ветви VD3.



Определим внутреннее сопротивление измерителя тока для всех использованных при снятии ВАХ пределов измерения.

Для этого из схемы исключим диод, т.е. соберем схему рис. 2, а. Для пределов 20 и 200 мкА последовательно с измерителем тока включим резистор 100 кОм, для остальных пределов – 620 Ом.

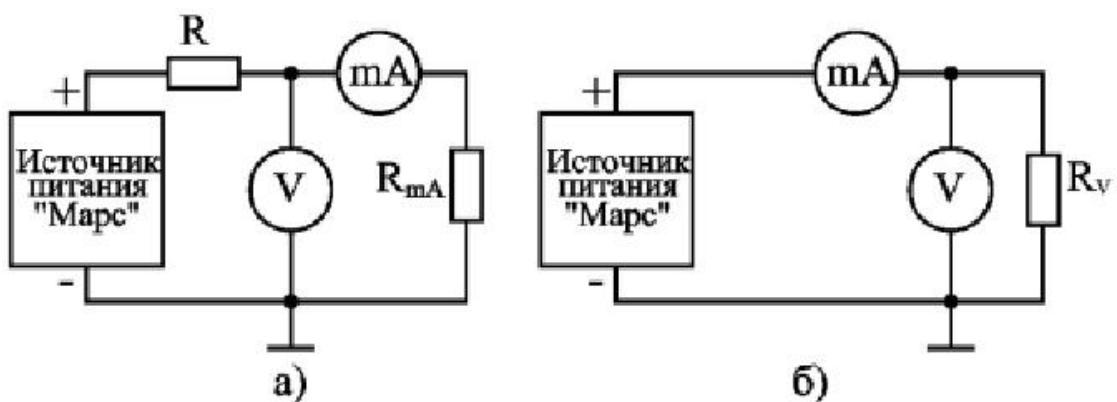


Рисунок 2 – Схемы для определения внутреннего сопротивления миллиамперметра (а) и вольтметра (б).

I, mA	U, В
0,02	0,02
0,2	0,02
10	0,02
20	0,02
30	0,02

Таблица 6 – Результаты снятия ВАХ схемы для измерения внутреннего сопротивления миллиамперметра.

Определим внутреннее сопротивление вольтметра для всех использованных при снятии ВАХ пределов измерения.

Для этого соберем схему рис. 7. б. Изменяя напряжение источника питания, установим по вольтметру напряжение 10 В (для предела 20 В) или 1 В (для предела 2 В), измерим ток и по результатам измерений определим внутреннее сопротивление вольтметра.

I, mA	U, В
1	10
0,1	1

Таблица 7 – Результаты снятия ВАХ схемы для измерения внутреннего сопротивления вольтметра.

Используем формулу для схемы с последовательно включенными

$$I = \frac{U}{R + R_{\text{вн}}}, \text{ где } R_{\text{вн}} - \text{внутреннее сопротивление прибора.}$$

$$\text{Откуда } R_{\text{вн}} = \frac{U}{I} - R.$$

элементами.

Для миллиамперметра:

$$R_{BH} = -99\,999,999 \text{ Ом}$$

Для вольтметра:

$$R_{BH} = -99\,999,9999 \text{ Ом}$$

Обработка экспериментальных данных

1. По измеренным ВАХ определить:

1) сопротивление по постоянному току и дифференциальное сопротивление диодов VD1 и VD2 в прямом включении для $I_{пр} = 5 \text{ мА}$;

$$R_D = \frac{U}{I} - \text{сопротивление по постоянному току.}$$

VD1:

$$R_D = 54 \text{ Ом}$$

VD2:

$$R_D = 120 \text{ Ом}$$

$$r_D = \frac{dU}{dI} - \text{дифференциальное сопротивление.}$$

VD1:

$$r_D = 16,667 \text{ Ом}$$

VD2:

$$r_D = 13,333 \text{ Ом}$$

2) сопротивление по постоянному току и дифференциальное сопротивление диодов VD1 и VD2 в обратном включении для $U_{обр} = -5 \text{ В}$;

VD1:

$$R_D = 553\,097 \text{ Ом}$$

$$r_D = 2\,586\,206 \text{ Ом}$$

VD2:

$$R_D = 71\,428\,571 \text{ Ом}$$

$$r_D = 150\,000\,000 \text{ Ом}$$

3) дифференциальное сопротивление стабилитрона при токах стабилизации 2 мА и 7 мА.

$$r_{D2mA}=20 \text{ Ом}$$

$$r_{D5mA}=3,33 \text{ Ом}$$

Выводы по результатам работы:

Мы рассмотрели и сравнили с помощью ВАХ кремниевый и германиевый диоды. Прямые ветви ВАХ имеют похожий вид, однако ВАХ кремниевого диода находится правее ВАХ германиевого диода, что объясняется разной величиной контактной разности потенциалов их р-п-переходов. Типовые значения ϕ_K для кремниевых р-п-переходов 0,7-0,8 В, для германиевых 0,3-0,4 В, поэтому у кремниевых диодов прямые напряжения оказываются больше, чем у германиевых. Кремниевые диоды имеют обратные токи гораздо меньшие, чем германиевые, а разная форма обратных ветвей их ВАХ объясняется различным соотношением составляющих обратного тока I_T , I_{TG} и I_U . В германиевых диодах I_T значительно превышает I_{TG} и I_U , поэтому при малых обратных напряжениях $I_{обр}$ резко возрастает, а далее ВАХ может идти почти горизонтально. В кремниевых диодах $I_T \ll I_{TG}$, поэтому начальный скачок обратного тока мал, а зависимость обратного тока от обратного напряжения проявляется гораздо сильнее, чем в германиевых диодах. При превышении обратным напряжением некоторого предельного значения наблюдается резкое возрастание обратного тока, называемое пробоем р-п-перехода. Для германиевых диодов типичным является тепловой пробой, а для кремниевых диодов – лавинный или (реже) туннельный.

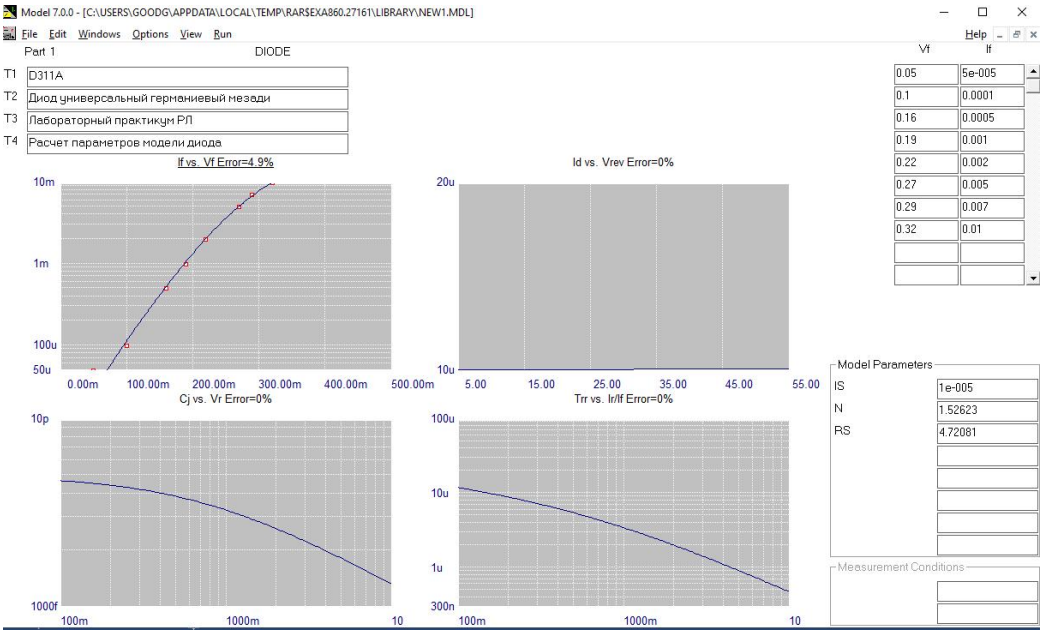
ОПРЕДЕЛИТЬ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ДИОДА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА

I, mA	U, V
0,05	0,05
0,1	0,10
0,5	0,16
1	0,19
2	0,22
5	0,27

7	0,29
10	0,32

Таблица 1 – Результаты снятия ВАХ для прямой ветви ДЗ11А.

Используя экспериментальные данные из табл. 1 получим характеристики диода ДЗ11А в программе MODEL.



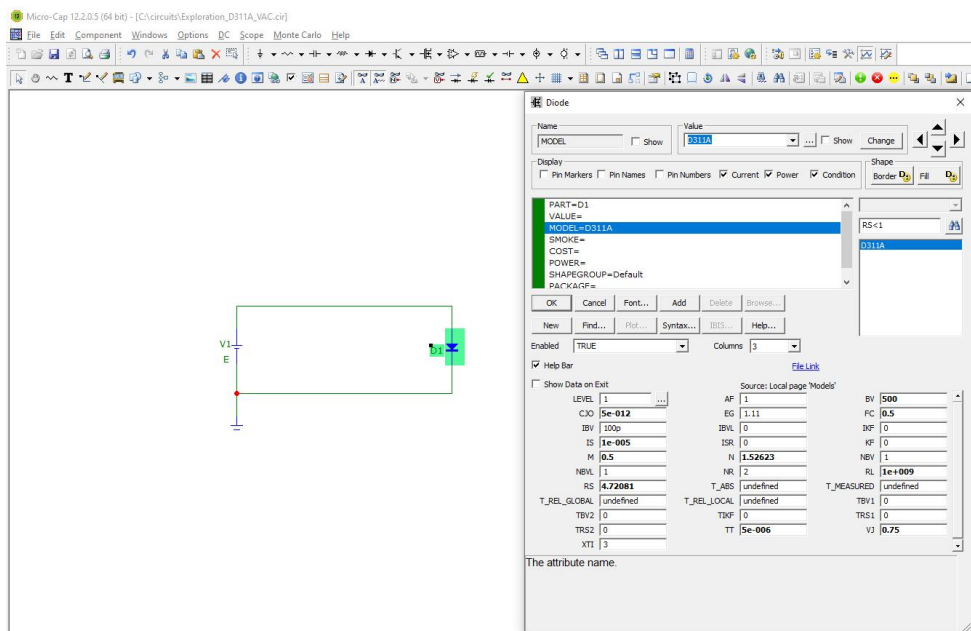
Model Parameters	
CJO	5e-012
M	0.5
VJ	0.75
FC	0.5
EG	1.11
XTI	3

Model Parameters	
RL	1e+009
BV	500

Model Parameters	
TT	5e-006

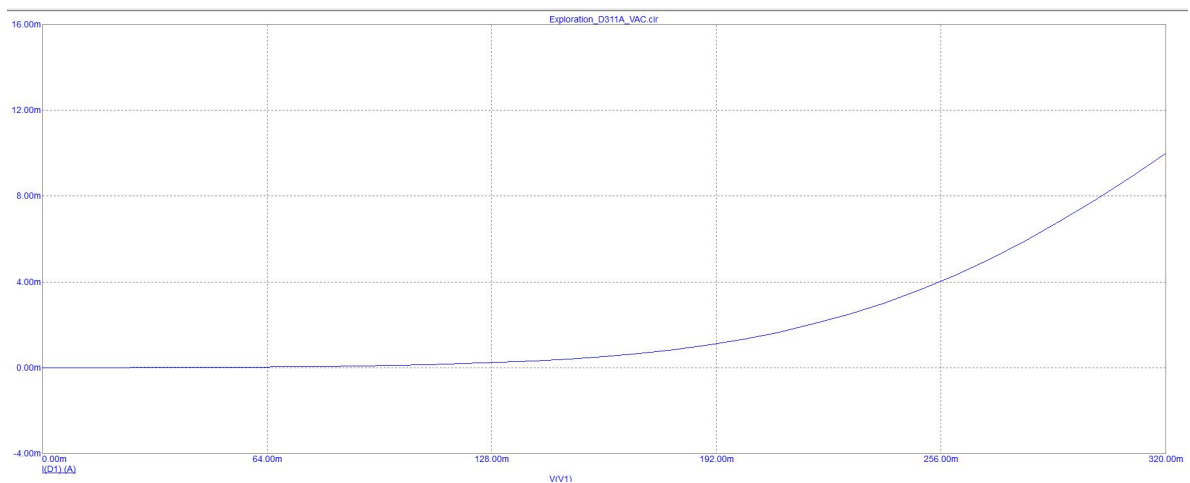
Model Parameters	
IS	1e-005
N	1.52623
RS	4.72081

Теперь соберем схему в программе Microcap и в используемом диоде используем параметры, полученные в программе MODEL.

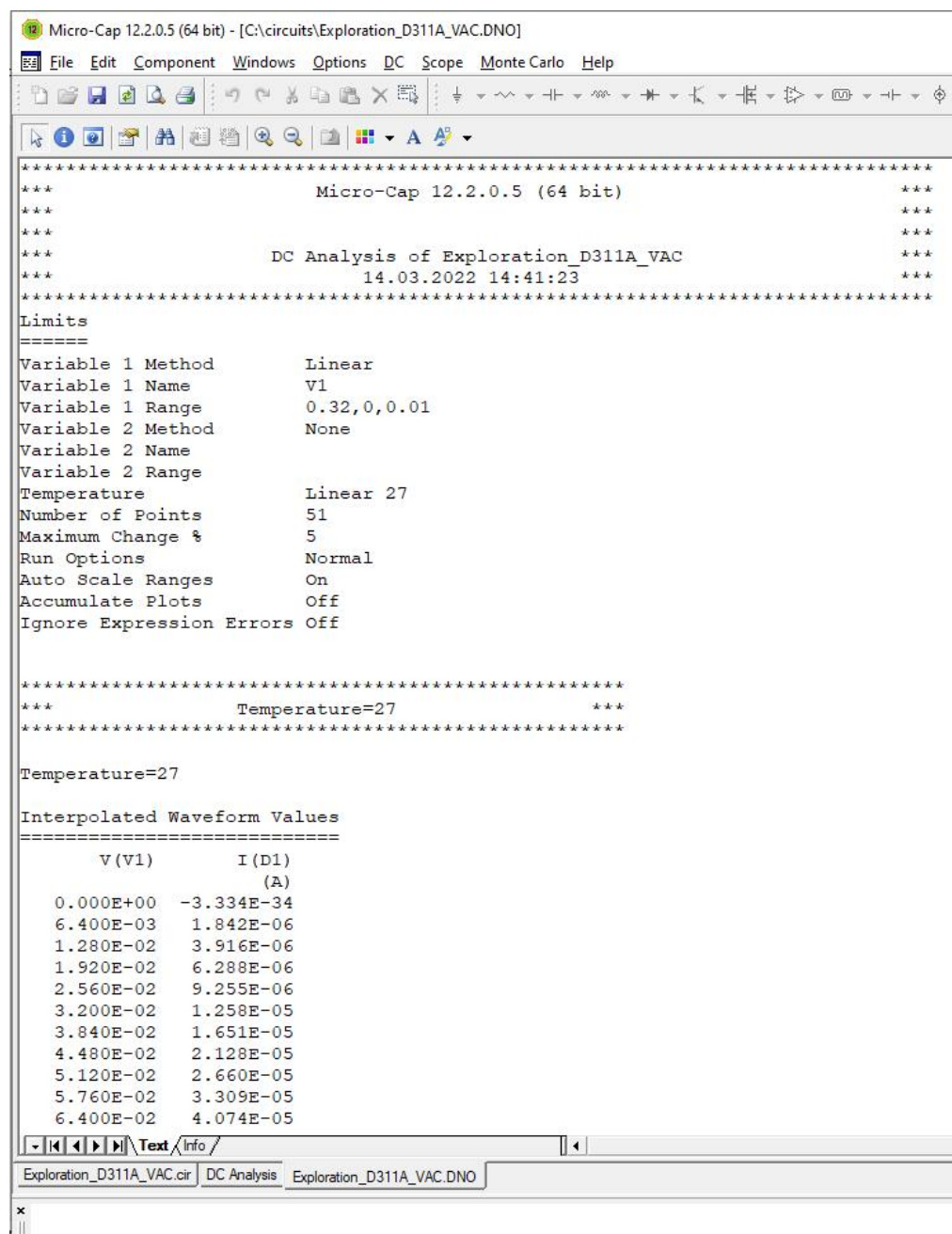


Жирным шрифтом в параметрах диода обозначены те значения, которые были посчитаны в программе MODEL.

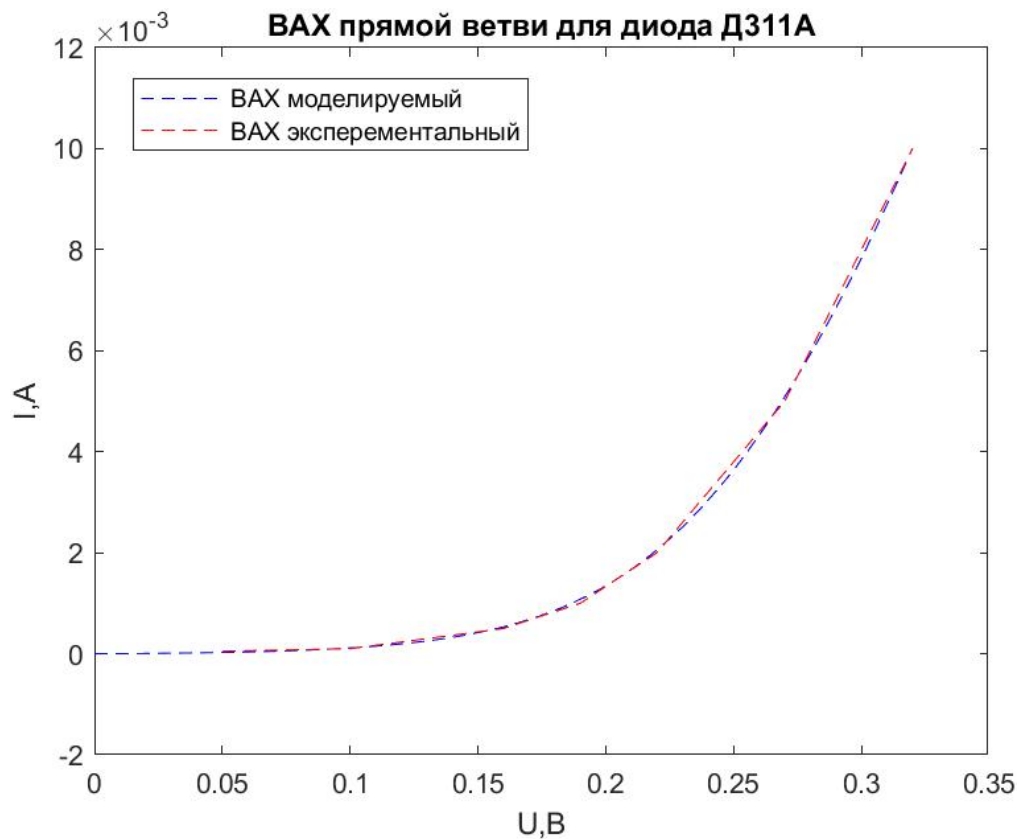
Получим график DC Analysis:



Из этого графика с помощью Numeric Output получим конкретные значения для силы тока и напряжения:



После чего данные из полученного файла табличных значений занесем в MATLAB для построения графика ВАХ и сравнения экспериментального ВАХ, полученного на лабораторной работе с ВАХ, который был построен программой Microsar с параметрами диода из программы MODEL.



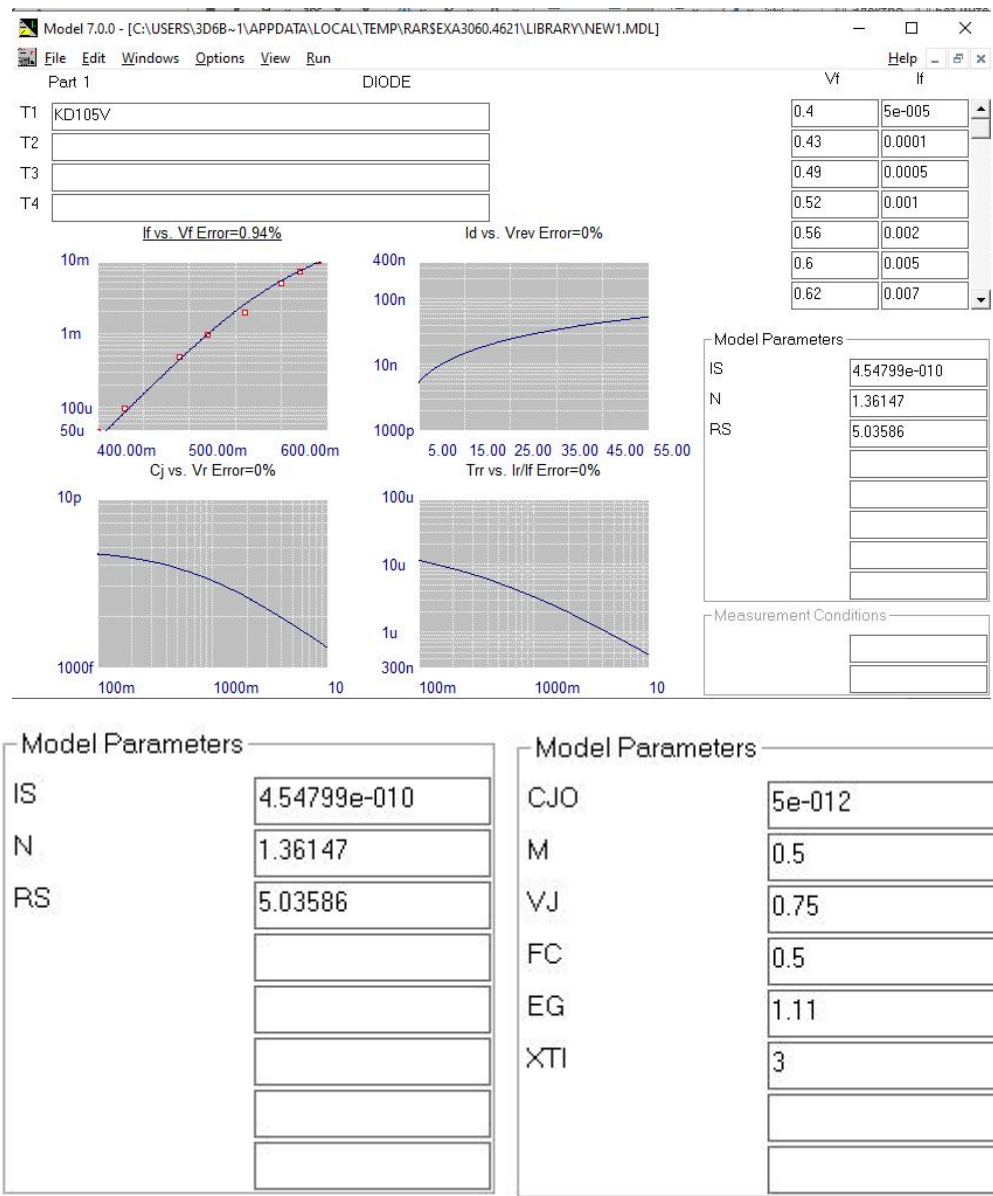
ВАХ, полученный экспериментально почти не отличается от моделируемого, это может говорить только о высокой точности моделирования программы MODEL.

Теперь аналогично первому исследуем второй диод КД105В:

I, mA	U, В
0,05	0,4
0,1	0,43
0,5	0,49
1	0,52
2	0,56
5	0,6
7	0,62
10	0,64

Таблица 2 - Результаты снятия ВАХ для прямой ветви КД105В.

Используя экспериментальные данные из табл. 2 получим характеристики диода КД105В в программе MODEL.



Model Parameters

RL

1e+009

BV

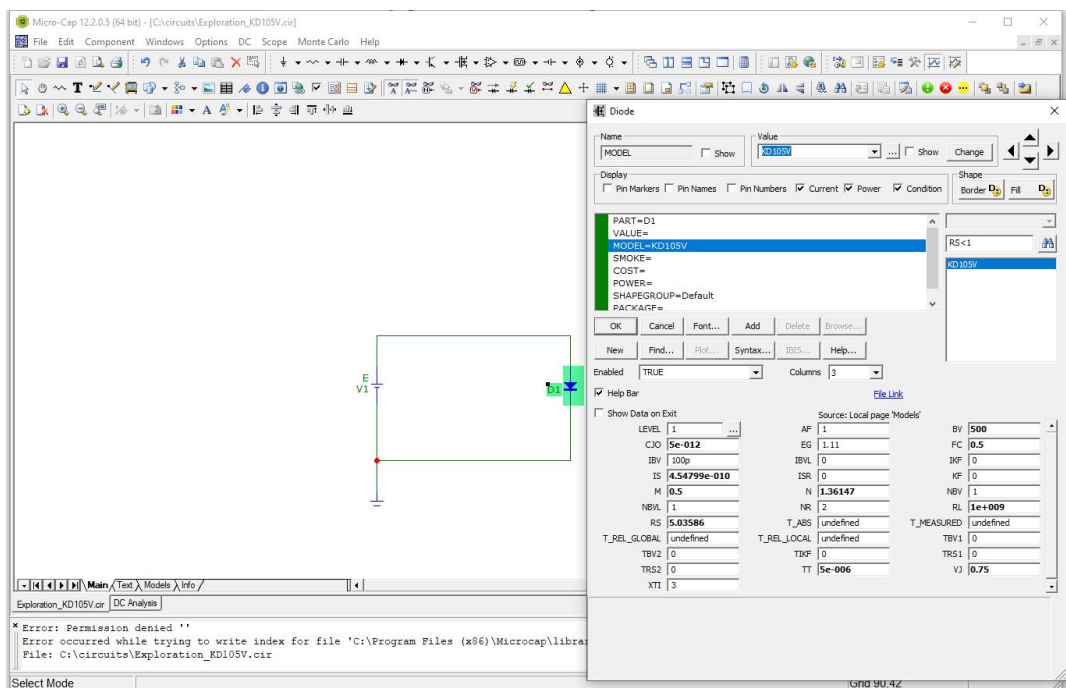
500

Model Parameters

TT

5e-006

Теперь соберем схему в программе Microcap и в используемом диоде используем параметры, полученные в программе MODEL.



Жирным шрифтом в параметрах диода обозначены те значения, которые были посчитаны в программе MODEL.

DC Analysis Limits

Run

Add

Delete

Expand...

Stepping...

Properties...

Help...

Sweep

Method

Name

Range

Variable 1

Linear

V1

0.7,0.4,0.01

Variable 2

None

Temperature

Method

Range

Number of Points

Maximum Change %

Linear

27

51

5

Run Options

Normal

Auto Scale Ranges

Accumulate Plots

Ignore Expression Errors

Page

P

X Expression

Y Expression

X Range

Y Range

1

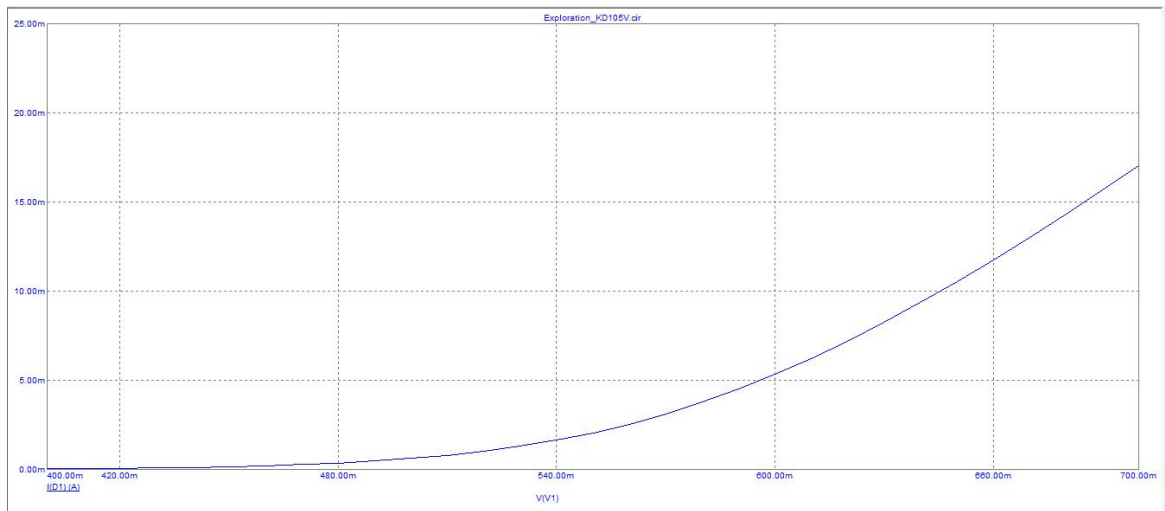
DCINPUT1

I(D1)

0.7,0.4,0.06

0.025,0.0,0.005

Получим график DC Analysis:



Из этого графика с помощью Numeric Output получим конкретные значения для силы тока и напряжения:

```

Micro-Cap 12.2.0.5 (64 bit) - [C:\circuits\Exploration_KD105V.txt]
File Edit Component Windows Options DC Scope Monte Carlo Help

*****
***                               Micro-Cap 12.2.0.5 (64 bit)                               ***
***                                                                                       ***
***                               DC Analysis of Exploration_KD105V                               ***
***                               14.03.2022 15:56:32                               ***
*****

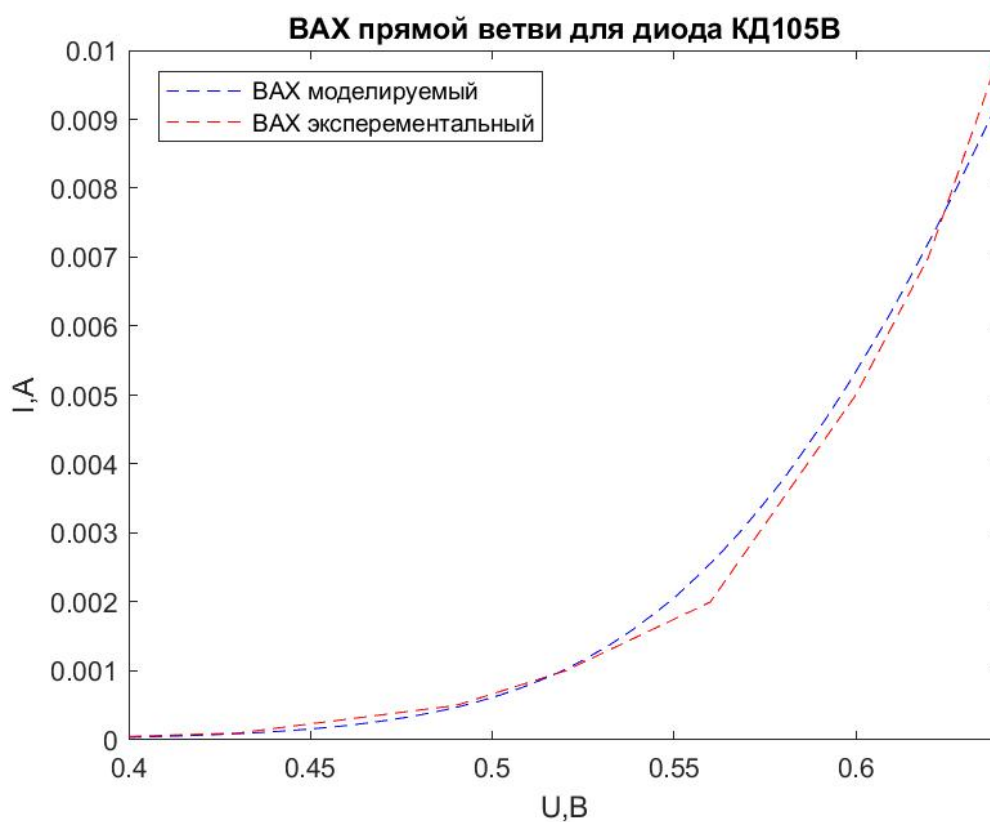
Limits
=====
Variable 1 Method      Linear
Variable 1 Name        V1
Variable 1 Range       0.7,0.4,0.01
Variable 2 Method      None
Variable 2 Name
Variable 2 Range
Temperature             Linear 27
Number of Points       51
Maximum Change %      5
Run Options            Normal
Auto Scale Ranges     On
Accumulate Plots      Off
Ignore Expression Errors Off

*****
***                               Temperature=27                               ***
*****

Temperature=27

Interpolated Waveform Values
=====
      V (V1)      I (D1)
              (A)
4.000E-01  3.879E-05
4.060E-01  4.638E-05
4.120E-01  5.478E-05
4.180E-01  6.482E-05
4.240E-01  7.700E-05
4.300E-01  9.026E-05
4.360E-01  1.077E-04
4.420E-01  1.271E-04
4.480E-01  1.501E-04
4.540E-01  1.779E-04
4.600E-01  2.081E-04
4.660E-01  2.475E-04
  
```

После чего данные из полученного файла табличных значений занесем в MATLAB для построения графика ВАХ и сравнения экспериментального ВАХ, полученного на лабораторной работе с ВАХ, который был построен программой Microsar с параметрами диода из программы MODEL.



Вот так выглядит график ВАХ прямой ветви для диода КД105В. Видно, что экспериментальные данные хорошо совпадают с модельными.