

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Дисциплина электроника**  
*Лабораторный практикум №1*  
*по теме: «Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов»*

Работу выполнил:  
студент группы РЛ1-43  
Трубников Дмитрий

Работу проверил:  
Загидуллин Равиль Шамильевич

Москва, 2016 г.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата

					Лабораторный практикум №1							
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	Полупроводниковый диод  Вариант №19				Лит		Лист	Листов
Разраб.	Трубников										2	15
Пров.	Загидуллин								МГТУ им. Н.Э.Баумана группа РЛ1-43			
Т. контр.												
Н. контр.												
Утв.												

# Часть 1

Для заданного диода марки D2D202D, соответствующий моему варианту, проведем моделирование лабораторного стенда для получения ВАХ диода в программе Micro-Cap 9 как на прямой, так и на обратной ветвях по показанным ниже схемам:

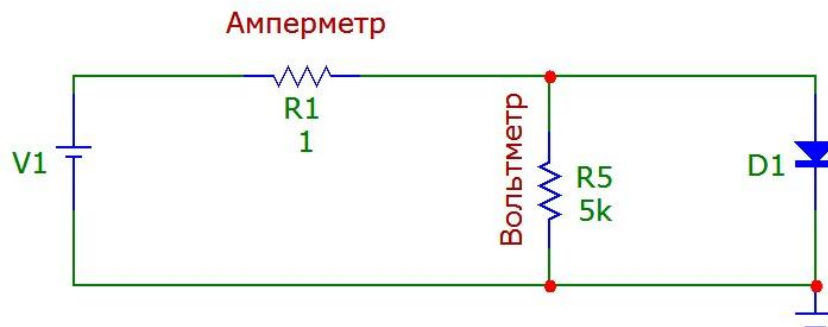


Схема для снятия  
ВАХ с прямой ветви

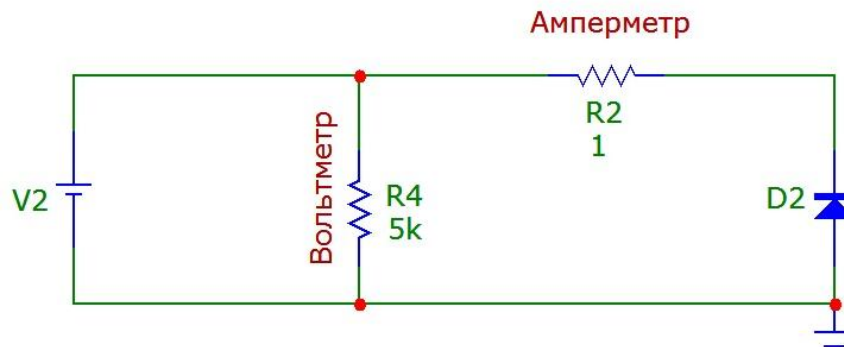


Схема для снятия  
ВАХ с обратной ветви

Данный выбор схем объясняется следующими соображениями. Несмотря на то, что идеальных измерительных приборов не существует, все-таки амперметр должен обладать относительно малым сопротивлением, а вольтметр, наоборот, довольно значительным. При прямом включении диод имеет малое сопротивление, и, если параллельно к нему подключить вольтметр, то потери в токе будут не значительны, т.к. сопротивление вольтметра во много раз превышает сопротивление диода при прямом включении. При обратном включении такая схема не прокатит, т.к. сопротивления диода и вольтметра станут соизмеримы, и потери в токе окажутся весомыми. Поэтому следует точно измерить ток на ветви диода, вставив в нее амперметр, потерями напряжения можно пренебречь, т.к. падение напряжения на диоде при обратном включении будет гораздо больше потерь на амперметре. Проиллюстрируем сказанное графиками, построенным в Micro-Cap 9 по схемам, приведенным выше.

## Лабораторный практикум №1

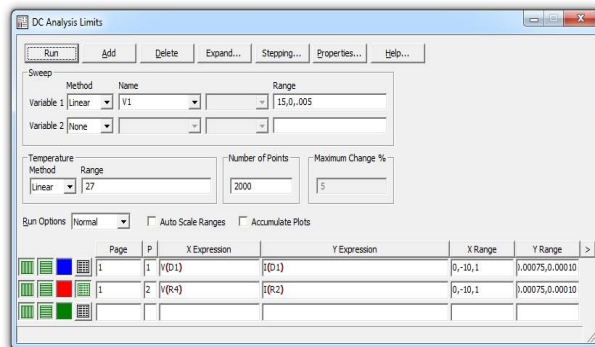
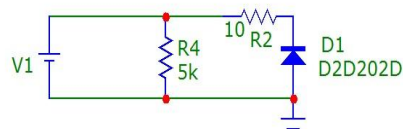
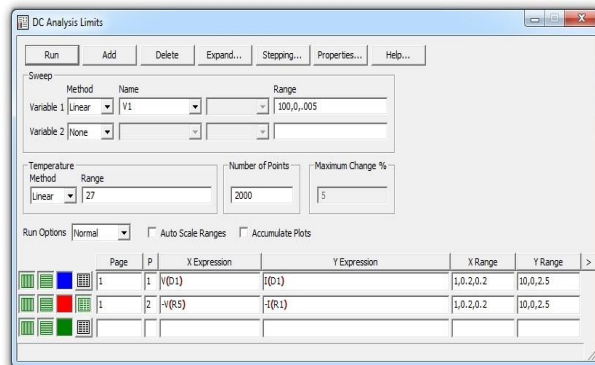
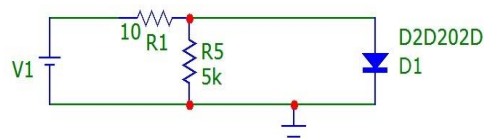
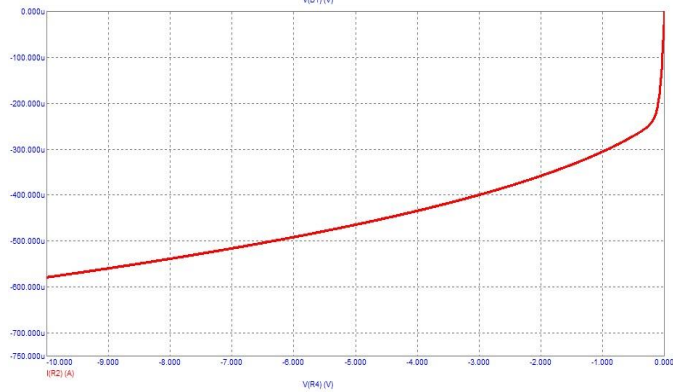
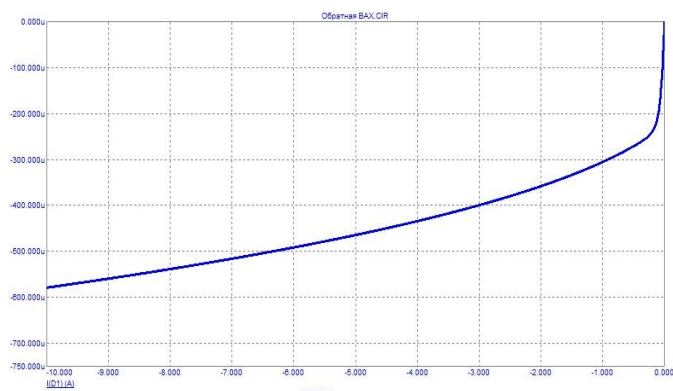
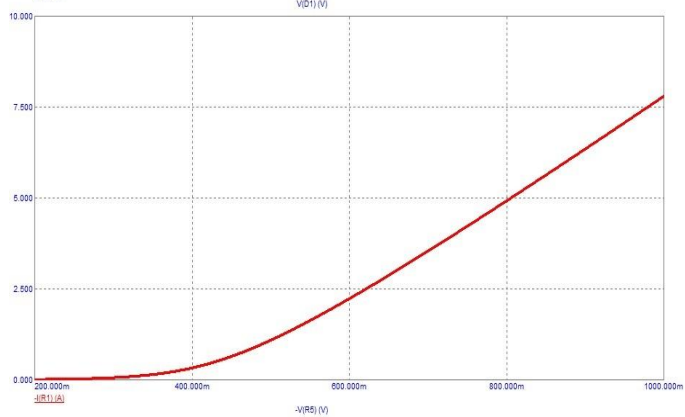
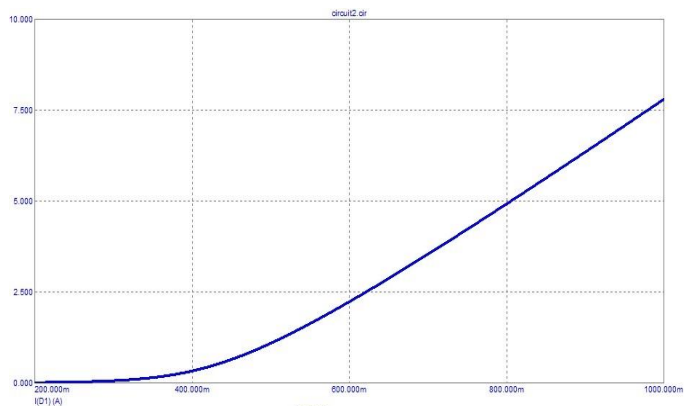
Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	3	15
МГТУ им. Н.Э.Баумана		
группа РЛ1-43		

Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				



- Синие кривые – ВАХ снятые прямо с диода
- Красные кривые – ВАХ снятые с «приборов»

## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	4	15

МГТУ им. Н.Э.Баумана  
группа РЛ1-43

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Как хорошо видно из графиков, наши догадки оказались верны, и ВАХ, снятые по показаниям «приборов», ненамного отличаются от своих истинных значений. Поэтому, для чистоты эксперимента, сохраним в текстовом файле и будем использовать в дальнейшем данные, снятые по показаниям «приборов». Для анализа нашей ВАХ и нахождения физических параметров диода воспользуемся программой *MathCAD*. Чтобы вычислительный блок *Given...Minerr* сработал как можно точнее, возьмем 5 точек в наиболее нелинейной части ВАХ.

D := READPRN("C:\Users\Дмитрий\Desktop\отчет\_электроника\Прямая ВАХ.DNO")

	U	I
	0	1
D =	0	0
	0.047	$3.34 \cdot 10^{-4}$
	0.09	$1.03 \cdot 10^{-3}$
	0.127	$2.292 \cdot 10^{-3}$
	0.158	$4.226 \cdot 10^{-3}$
	0.182	$6.78 \cdot 10^{-3}$
	0.202	$9.832 \cdot 10^{-3}$
	0.218	0.013
	0.231	0.017
	0.242	0.021
	0.251	0.025
	0.26	0.029
	0.267	0.033
	0.274	...

$$Id1 := \max(D^{(1)}) = 9.886 \quad Ud1 := \text{interp}(D^{(1)}, D^{(0)}, Id1) = 1.142$$

$$Id2 := \frac{Id1}{4} = 2.471 \quad Ud2 := \text{interp}(D^{(1)}, D^{(0)}, Id2) = 0.619$$

$$Id3 := \frac{Id2}{2} = 1.236 \quad Ud3 := \text{interp}(D^{(1)}, D^{(0)}, Id3) = 0.514$$

$$Id4 := \frac{Id3}{2} = 0.618 \quad Ud4 := \text{interp}(D^{(1)}, D^{(0)}, Id4) = 0.447$$

$$Id5 := \frac{Id4}{2} = 0.309 \quad Ud5 := \text{interp}(D^{(1)}, D^{(0)}, Id5) = 0.396$$

### Вычисление параметров диода:

$$Id = Is \cdot \left( \exp\left(\frac{Ud - Id \cdot Rb}{Ns \cdot Ft}\right) - 1 \right) \quad Ud = Id \cdot Rb + Ft \cdot Ns \cdot \ln\left(\frac{Is + Id}{Is}\right)$$

$$Ft := 0.0255 \quad Ns := 1.5 \quad Rb := 10^{-3} \quad Is := 10^{-6}$$

Given

$$Ud1 = Id1 \cdot Rb + Ft \cdot Ns \cdot \ln\left(\frac{Is + Id1}{Is}\right)$$

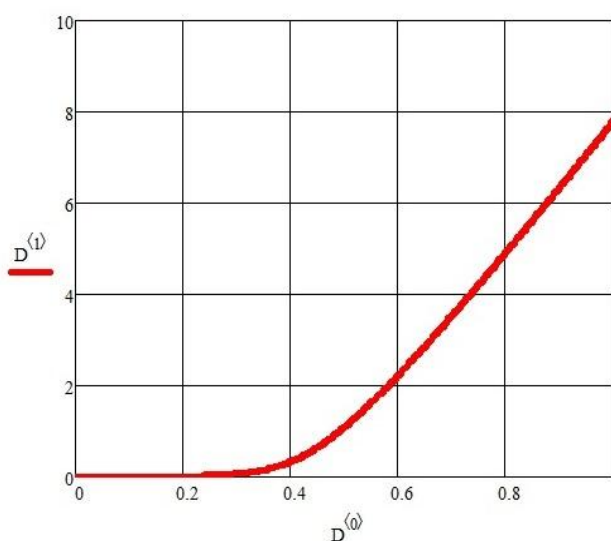
$$Ud2 = Id2 \cdot Rb + Ft \cdot Ns \cdot \ln\left(\frac{Is + Id2}{Is}\right)$$

$$Ud3 = Id3 \cdot Rb + Ft \cdot Ns \cdot \ln\left(\frac{Is + Id3}{Is}\right)$$

$$Ud4 = Id4 \cdot Rb + Ft \cdot Ns \cdot \ln\left(\frac{Is + Id4}{Is}\right)$$

$$Ud5 = Id5 \cdot Rb + Ft \cdot Ns \cdot \ln\left(\frac{Is + Id5}{Is}\right)$$

$$SovDiod := \text{Minerr}(Is, Rb, Ns) = \begin{pmatrix} 4.028 \times 10^{-5} \\ 0.062 \\ 1.657 \end{pmatrix}$$



Создадим в *Micro-Cap 9* новую модель диода по найденным нами параметрам. И сравним ВАХ новой модели (созданной нами) и старой (которая служила прототипом). В случае расхождения более чем на 10% используем функцию «Оптимизация», предусмотренную в *Micro-Cap*.

## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит Лист Листов  
5 15  
МГТУ им. Н.Э.Баумана  
группа РЛ1-43

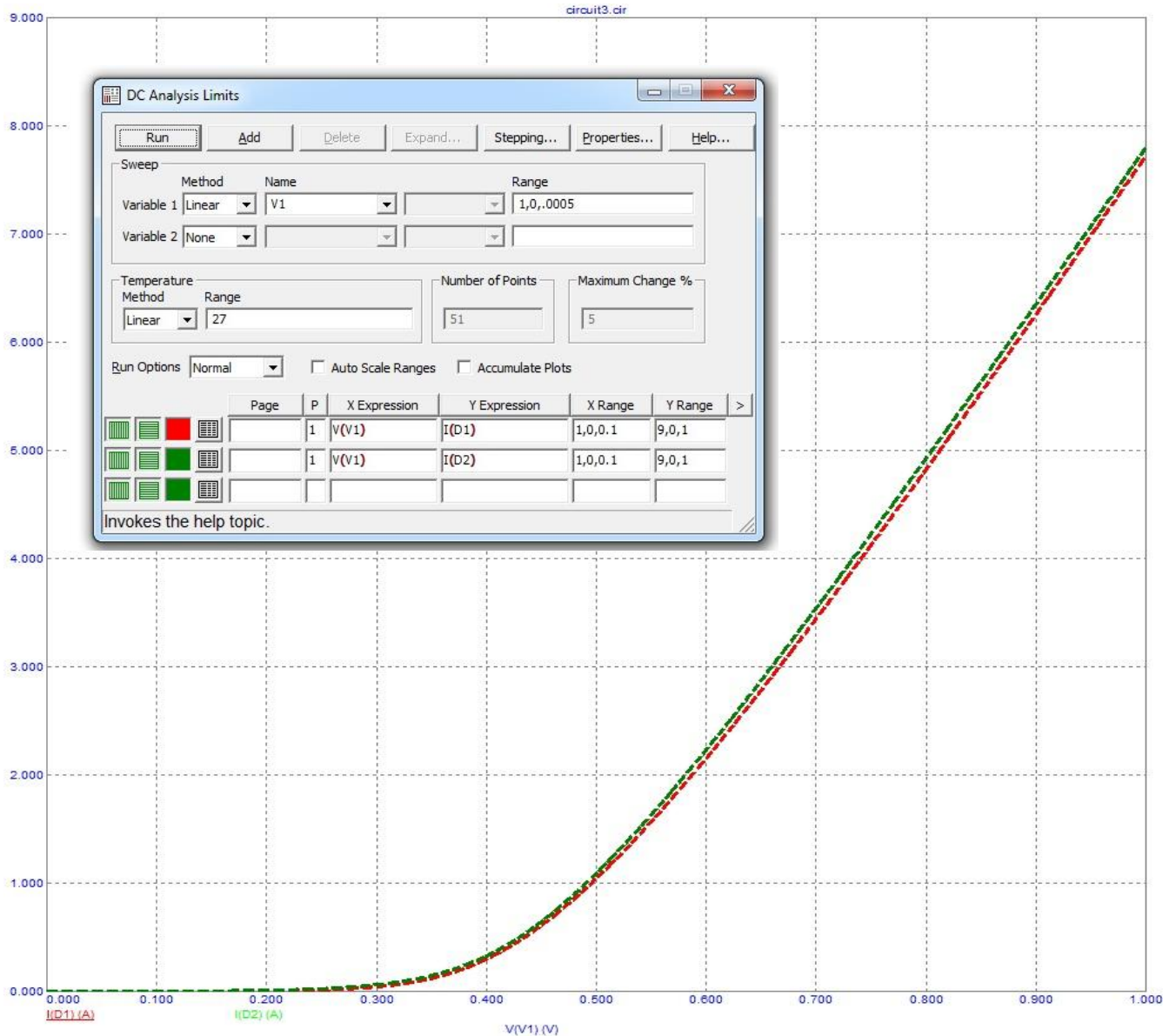
Подп. и дата  
Взам. инв. №  
Инв. № дубл.  
Подп. и дата  
Инв. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

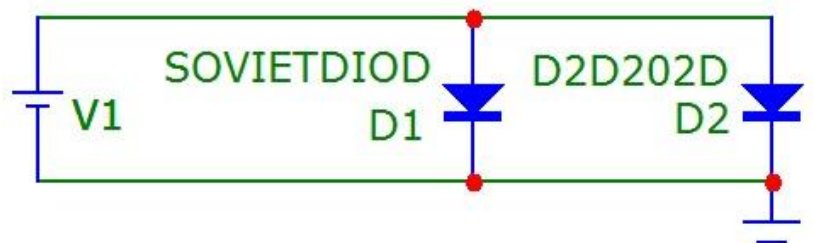


.model SovietDiod

D(Is=4.028E-5 Rs=0.062 N=1.657)



Очевидно, что погрешность составляет менее 10%. А значит, модель мы получили верную и дополнительных отладок она не требует.



## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит Лист Листов

6 15

МГТУ им. Н.Э.Баумана  
группа РЛ1-43

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубкинов			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				



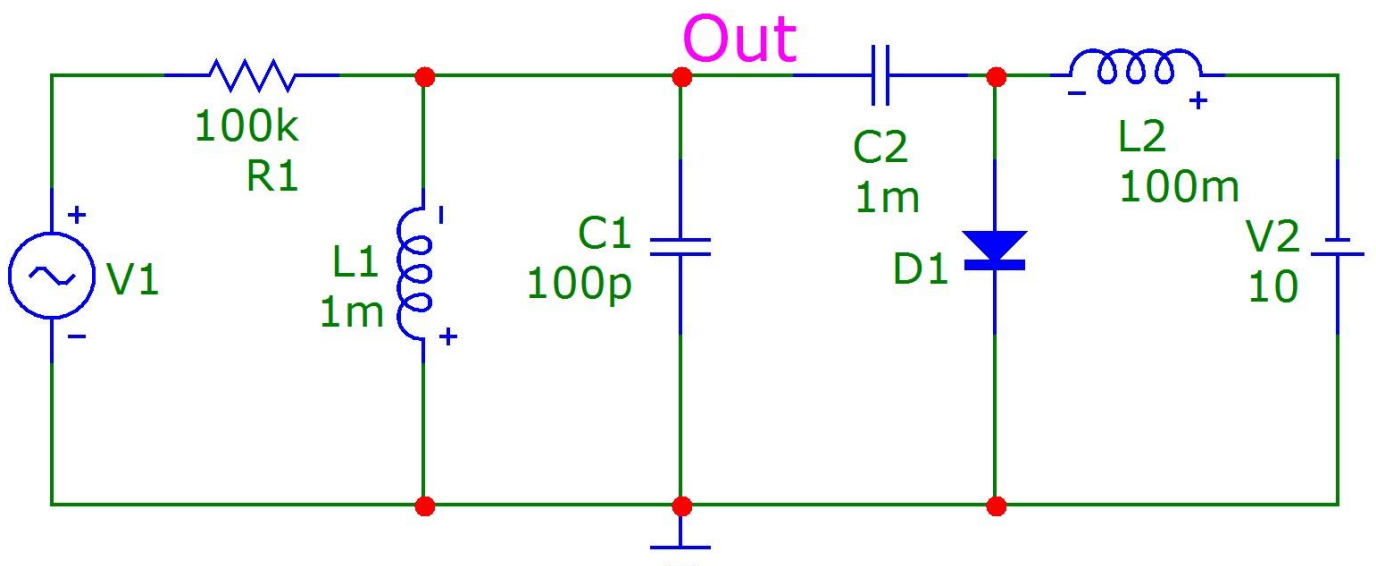
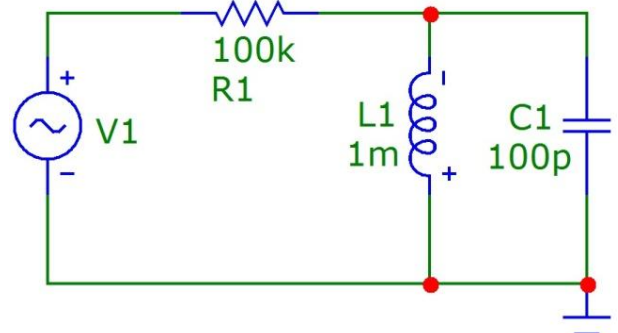
# Часть 2

Перейдем к снятию вольт-фарадной характеристики. Для получения ВФХ будем пользоваться схемой, приведенной внизу страницы. Наша цель – найти емкость диода при приложении к нему различного обратного напряжения. Чтобы осуществить это, для начала, построим обычный параллельный колебательный контур, показанный справа. Активным сопротивлением мы пренебрегли, а потому можем воспользоваться формулой Томпсона

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \approx 503,3 \text{ (кГц)}$$

и получить вполне точную резонансную частоту.

Подключив диод, мы добавим в параллельную ветвь еще один «конденсатор», эквивалентная емкость будет равняться сумме  $C_1$  и  $C_d$ . Однако, чтобы диод проявил свою барьерную емкость, необходимо подключить к нему постоянное напряжение. Кроме того, нужно избежать влияния источника постоянного напряжения на остальную цепь, локализовав его действие только на диоде и влияния остальной цепи на источник. Этого мы добьемся путем подключения дополнительных конденсатора  $C_2$  (обрывает постоянное напряжение) и катушки  $L_2$  (обрывает переменное напряжение). Последовательно меняя приложенное к диоду постоянно напряжение, мы тем самым будем изменять барьерную емкость диода, а, следовательно, и резонансные частоты всей цепи. С помощью вспомогательного окна построим график зависимости резонансных частот от приложенного постоянного напряжения.



## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит Лист Листов

7 15

МГТУ им. Н.Э.Баумана  
группа РЛ1-43

Подп. и дата

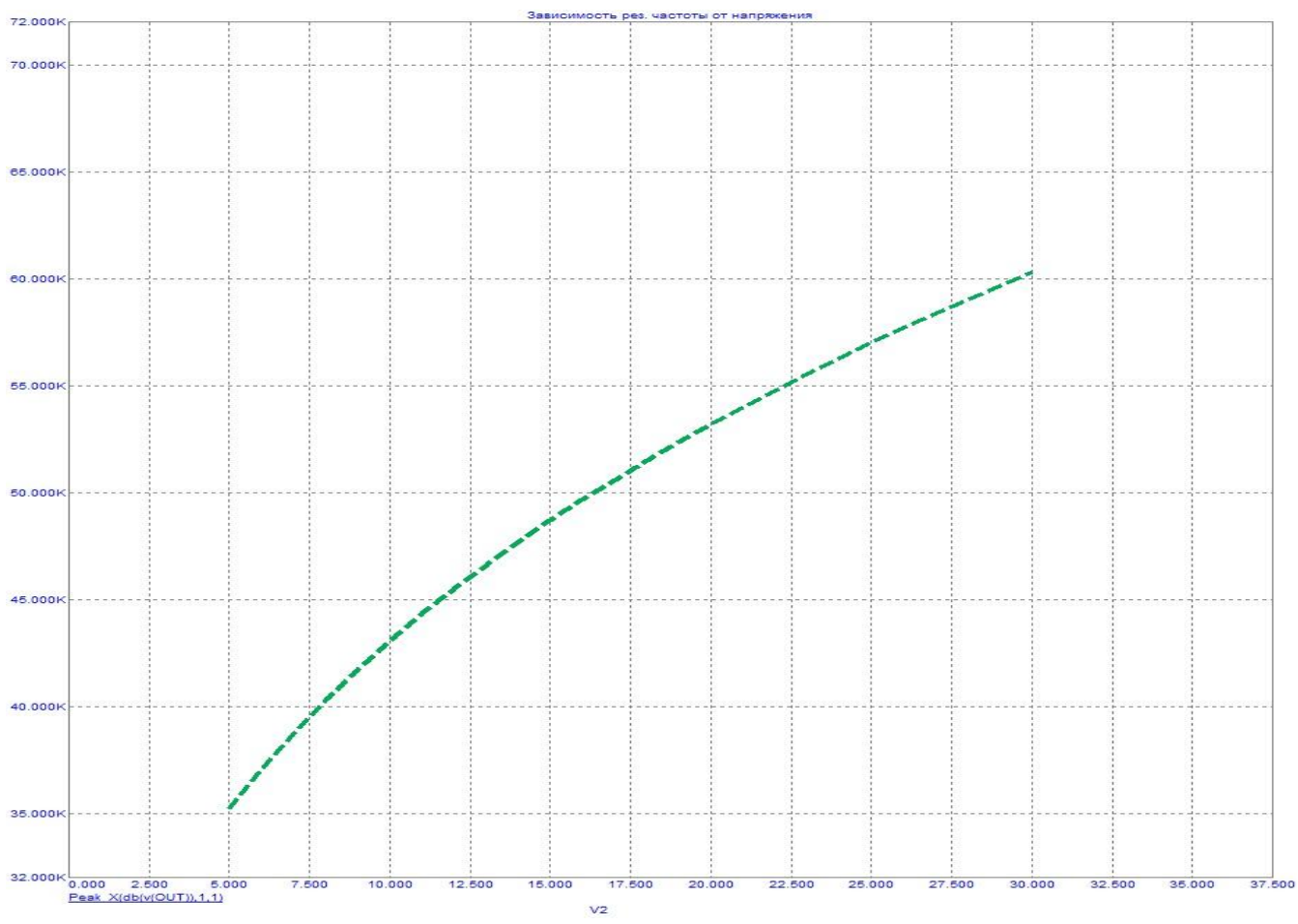
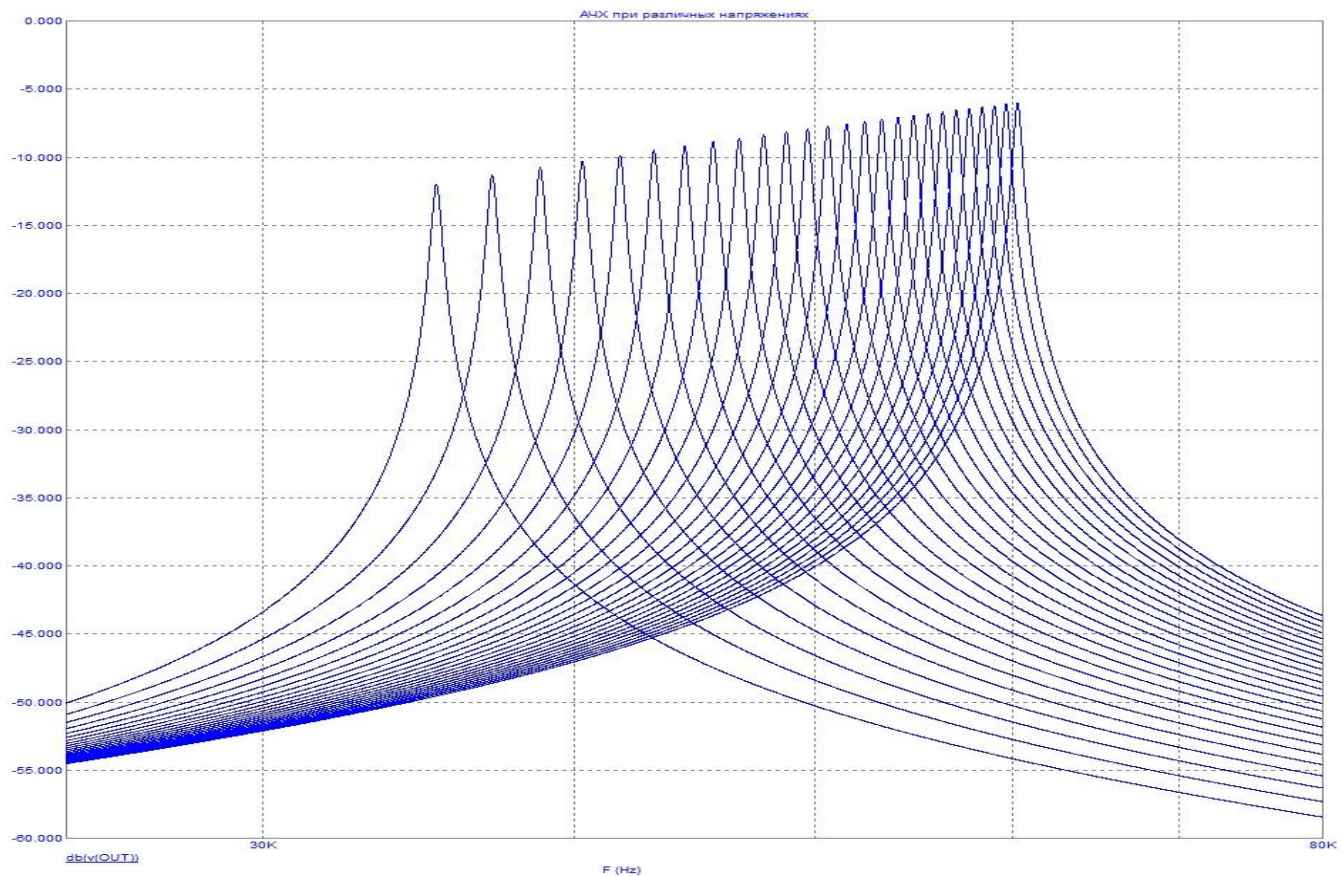
Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				



Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	8	15

МГТУ им. Н.Э.Баумана

группа РЛ1-43



Приведенные выше графики являются лишь вспомогательными пунктами для вычисления и построения ВФХ. Как уже было сказано, суммарная емкость цепи равняется сумме емкости конденсатора из параллельного колебательного контура и барьерной емкости диода (емкостью  $C_2$  можно пренебречь, т.к. она значительно больше емкости диода и включена с ним последовательно). Отправим полученные данные в *MathCAD*, выразим из формулы Томсона ёмкость и найдем барьерную емкость диода. После этого, пользуясь вычислительным блоком *Given...Minerr*, найдем динамические параметры диода.

T := READPRN("C:\Users\Дмитрий\Desktop\отчет электроника\Сейчас\Зависимость резонанса от напряжения.ANO")

$$T^{(0)} := T^{(0)} \cdot (-1)$$

U	Fрез
0	1
0	-5 3.521·10 <sup>4</sup>
1	-6 3.708·10 <sup>4</sup>
2	-7 3.876·10 <sup>4</sup>
3	-8 4.032·10 <sup>4</sup>
4	-9 4.173·10 <sup>4</sup>
5	-10 4.307·10 <sup>4</sup>
6	-11 4.432·10 <sup>4</sup>
7	-12 4.55·10 <sup>4</sup>
8	-13 4.661·10 <sup>4</sup>
9	-14 4.768·10 <sup>4</sup>
10	-15 4.869·10 <sup>4</sup>
11	-16 4.966·10 <sup>4</sup>
12	-17 5.059·10 <sup>4</sup>
13	-18 5.148·10 <sup>4</sup>
14	-19 5.235·10 <sup>4</sup>
15	-20 5.319·10 <sup>4</sup>
16	-21 5.399·10 <sup>4</sup>
17	-22 5.477·10 <sup>4</sup>
18	-23 5.553·10 <sup>4</sup>
19	-24 5.627·10 <sup>4</sup>
20	-25 5.698·10 <sup>4</sup>
21	-26 5.769·10 <sup>4</sup>
22	-27 5.836·10 <sup>4</sup>
23	-28 5.903·10 <sup>4</sup>
24	-29 5.968·10 <sup>4</sup>
25	-30 6.031·10 <sup>4</sup>

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$$L := 0.001$$

$$C(f) := \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot f^2}$$

$$C1 := 10^{-10}$$

$$Cd := C(T^{(1)}) - C1$$

0
2 1.676·10 <sup>-8</sup>
3 1.548·10 <sup>-8</sup>
4 1.444·10 <sup>-8</sup>
5 1.356·10 <sup>-8</sup>
6 1.28·10 <sup>-8</sup>
7 1.214·10 <sup>-8</sup>
8 1.156·10 <sup>-8</sup>
9 1.104·10 <sup>-8</sup>
10 1.059·10 <sup>-8</sup>
11 1.017·10 <sup>-8</sup>
12 9.797·10 <sup>-9</sup>
13 9.457·10 <sup>-9</sup>
14 9.142·10 <sup>-9</sup>
15 8.854·10 <sup>-9</sup>
16 8.59·10 <sup>-9</sup>
17 8.344·10 <sup>-9</sup>
18 8.114·10 <sup>-9</sup>
19 7.9·10 <sup>-9</sup>
20 7.701·10 <sup>-9</sup>
21 7.512·10 <sup>-9</sup>
22 7.338·10 <sup>-9</sup>
23 ...

$$Cd =$$

$$Cj := 10^{-12}$$

$$M := 0.41$$

$$Vj := 1$$

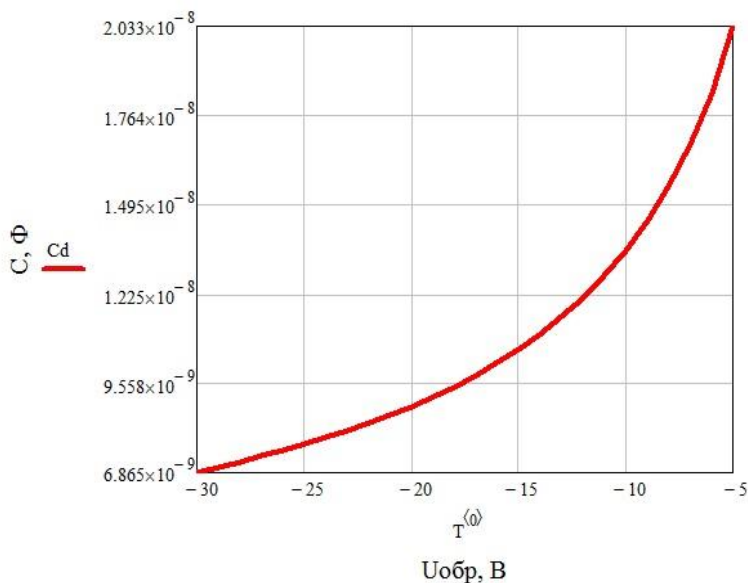
Given

$$Cd = Cj \cdot \left(1 - \frac{T^{(0)}}{Vj}\right)^{-M}$$

$$0 < Vj < 1.5$$

$$\frac{1}{3} < M < \frac{1}{2}$$

$$\text{Minerr}(Cj, Vj, M) = \begin{pmatrix} 1.179 \times 10^{-12} \\ 1.5 \\ 0.347 \end{pmatrix}$$



Занесем найденные динамические параметры в базу данных *Micro-Cap 9*:

```
.model SovietDiod
+
```

```
D(Is=4.028E-5 Rs=0.062 N=1.657
Cjo=1.179E-012 Vj=1.5 M=.347)
```

## Лабораторный практикум №1

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	9	15
МГТУ им. Н.Э.Баумана группа РЛ1-43		

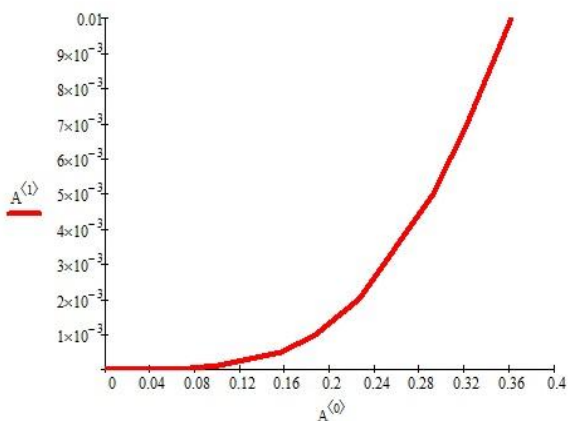
# Часть 3

Теперь создадим модель диода Д311, вольтамперные характеристики которого были получены нами на лабораторном стенде. Данные снимались согласно схемам, описанным в начале, чтобы обеспечения наименьшее расхождение результатов с реальными значениями. Для начала, занесём снятые характеристики в *MathCAD* и построим по ним прямую и обратную ветви:

## Диод Д311 (германиевый)

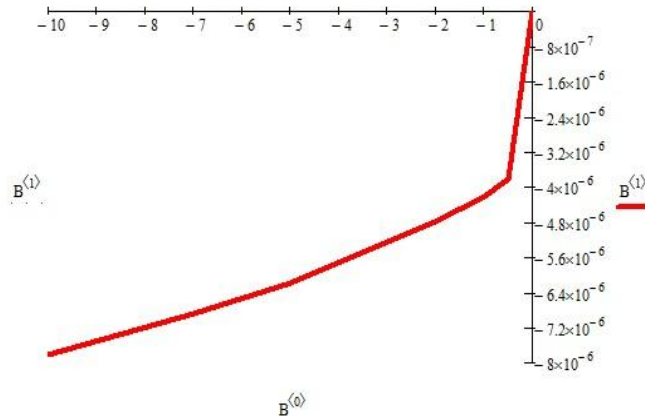
$$A := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0.076 & 0.05 \cdot 10^{-3} \\ 0.101 & 0.1 \cdot 10^{-3} \\ 0.157 & 0.5 \cdot 10^{-3} \\ 0.187 & 1 \cdot 10^{-3} \\ 0.226 & 2 \cdot 10^{-3} \\ 0.292 & 5 \cdot 10^{-3} \\ 0.323 & 7 \cdot 10^{-3} \\ 0.362 & 10 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Прямая ветвь  
ВАХ диода



$$B := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -0.5 & -3.83 \cdot 10^{-6} \\ -1 & -4.2 \cdot 10^{-6} \\ -2 & -4.8 \cdot 10^{-6} \\ -5 & -6.17 \cdot 10^{-6} \\ -7 & -6.87 \cdot 10^{-6} \\ -10 & -7.82 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Обратная ветвь  
ВАХ диода



Аналогично предыдущим случаям воспользуемся вычислительным блоком *Given...Minerr*, чтобы подсчитать такие физические параметры диода, как объемное сопротивление, ток насыщения и коэффициент неидеальности. Затем отправим полученные данные в *Micro-Cap 9*, чтобы создать и испытать модель для лабораторного диода.

## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	10	15
МГТУ им. Н.Э.Баумана		
группа РЛ1-43		

Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

$$I_s := 10^{-6} \quad R_b := 10^{-2} \quad N := 2 \quad F_t := 0.0255 \quad U_d := A^{(0)} \quad I_d := A^{(1)}$$

Given

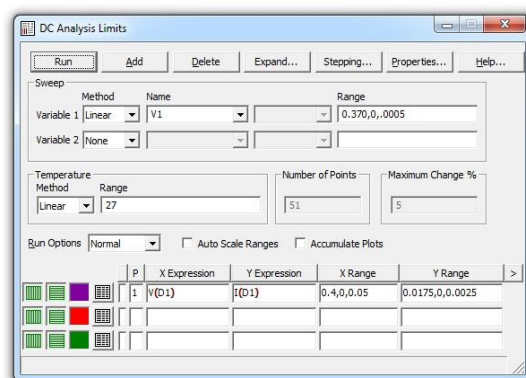
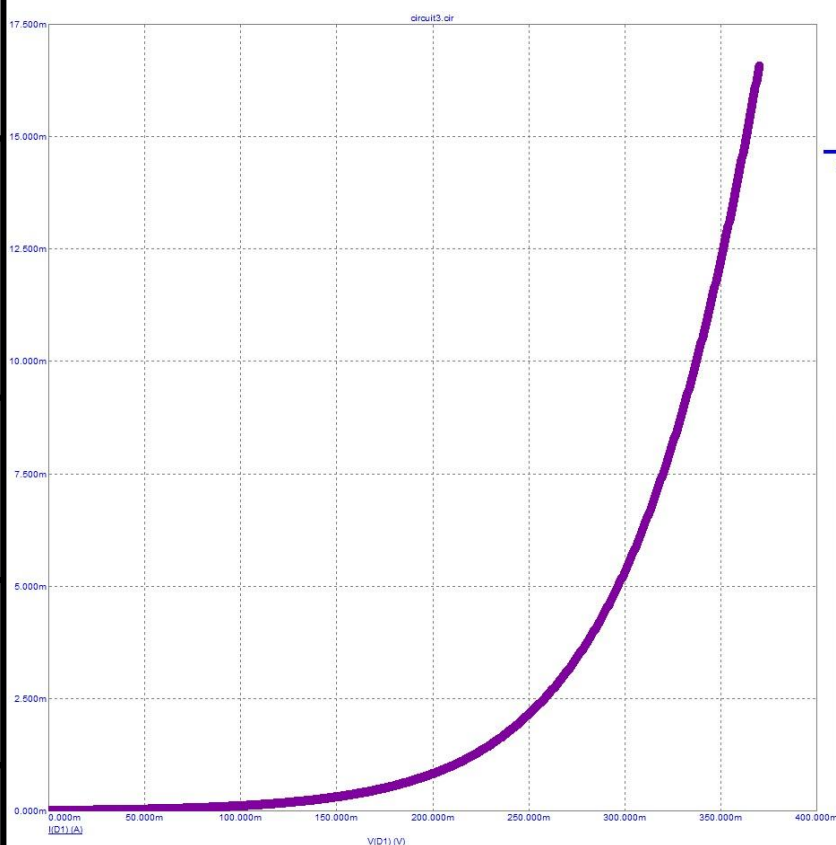
$$U_d = I_d \cdot R_b + N \cdot F_t \cdot \ln \left[ \frac{(I_s + I_d)}{I_s} \right] \quad \begin{matrix} 10^{-12} < I_s < 10^{-3} \\ 0 < R_b < 1 \\ 1 < N < 2 \end{matrix}$$

$$\text{Minerr}(I_s, R_b, N) = \begin{pmatrix} 1.801 \times 10^{-5} \\ 1 \\ 2.002 \end{pmatrix}$$

Создадим модель нашего диода в библиотеке *Micro-Cap 9*:

```
.model D311 D(Is=1.801E-5 Rs=1 N=2.002)
```

Построим ВАХ модели и передадим данные в *MathCAD* для сравнения:



## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит Лист Листов

11 15

МГТУ им. Н.Э.Баумана  
группа РЛ1-43

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

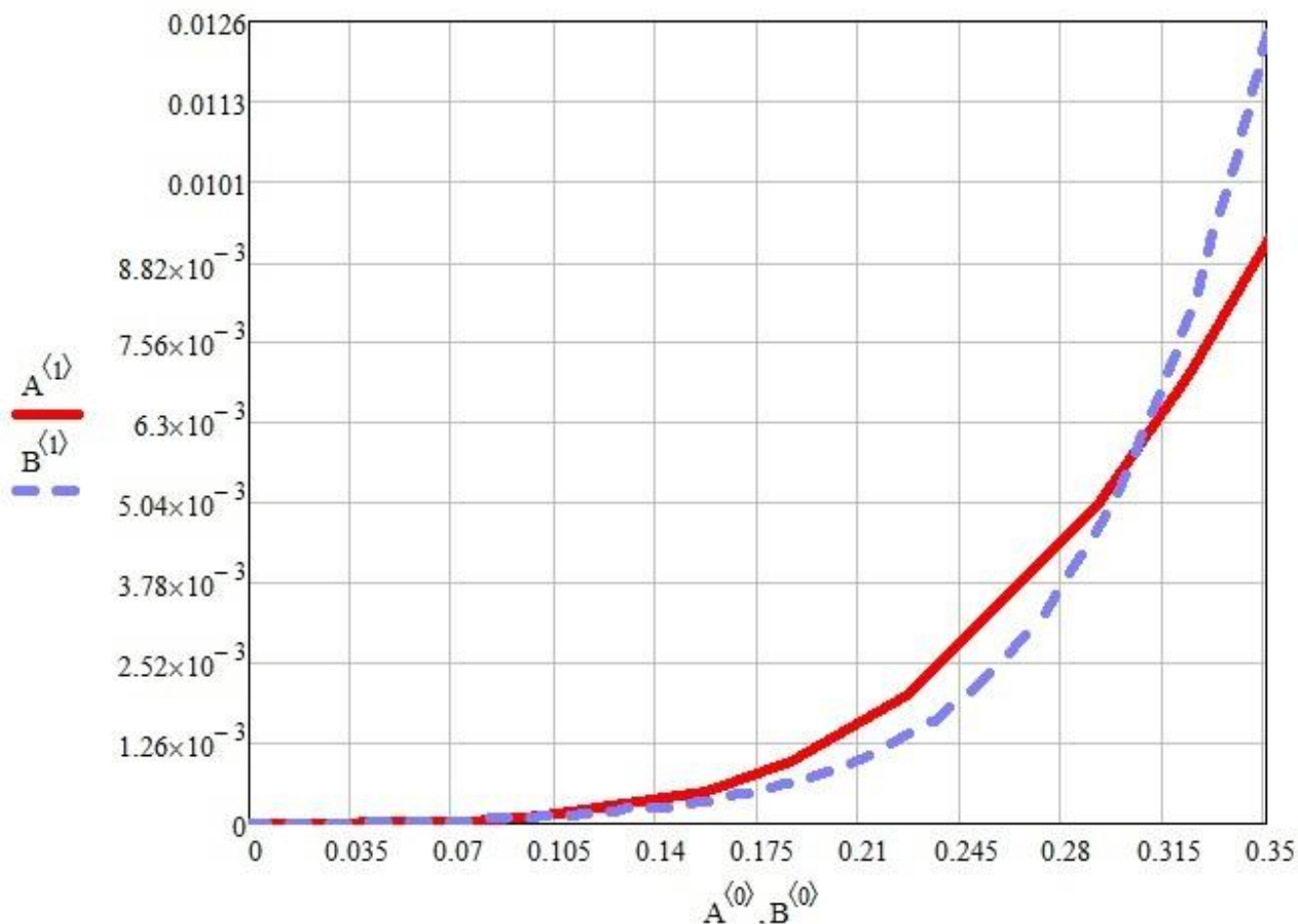
Подп. и дата

Инв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

После построения графиков стало очевидно, что погрешность между ВАХ модели и диода, при максимальном значении приложенного напряжения ( $U=0.35V$ ), больше допустимых 10%.

$B := \text{READPRN}("C:\text{Users}\text{Дмитрий}\text{Desktop}\text{отчет электроника}\text{ВАХ модели.DNO}")$



$$a := \text{linterp}(A^{(0)}, A^{(1)}, 0.35) = 9.077 \times 10^{-3}$$

$$b := \text{linterp}(B^{(0)}, B^{(1)}, 0.35) = 0.012$$

$\frac{b}{a} = 1.35$  при напряжении 350 мВ погрешность составляет 35%

Чтобы исправить положение, воспользуемся функцией оптимизации в *Micro-Cap 9*. За опорные точки возьмем измеренные на лабораторной работе значения тока и напряжения диода. Оптимизированные параметры внесём в модель диода.

## Лабораторный практикум №1

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубников			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	12	15
МГТУ им. Н.Э.Баумана группа РЛ1-43		



Optimize

Find	Parameter	Low	High	Step	Current	Optimized
- + Get	D D311(IS)	9e-012	3.6e-003	0.00072	19.158u	19.158u
- + Get	D D311(N)	1	2	0.2	1.911	1.911
- + Get	D D311(RS)	0.00005	10	1.99999	4.999	4.999
- + Get					0	0

That	Performance Function Expression	To	Current	Optimized	Error
Equates - + Get	Y_Level(I(D1),1,1,0.350)	9.077m	9.077m	9.077m	559.587p
None - + Get					
None - + Get					
None - + Get					

Method: ☐ Standard Powell ☒ Stepping Powell ☒ Update Plot

RMS Error: 559.587p

Constraints:

Optimize Stop Apply Format... Settings... Close Help...

Итого, мы имеем:

- $R_s=19.16 \cdot 10^{-6}$ , получен путем оптимизации
  - $I_s=5$ , получен путем оптимизации
  - $N=1.9$ , получен путем оптимизации
  - $F_t=0.0255$  договорились взять его за постоянную величину
  - $E_g=0.7$  приблизительно для германия
  - $R_l=2,5 \cdot 10^6$  получили из линейной части обратной ветви ВАХ
  - $B_v=30$  взяли из справочных материалов
  - $C_j=1.5 \cdot 10^{-12}$  взяли из справочных материалов
- (фотографии справочников приложены в архиве)

```
.model D311      D(Is=19.158u      Rs=5      N=1.911
+                Cj=1.5p           Eg=0.7      Bv=30)
*
```

## Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит Лист Листов

13 15

МГТУ им. Н.Э.Баумана  
группа РЛ1-43

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

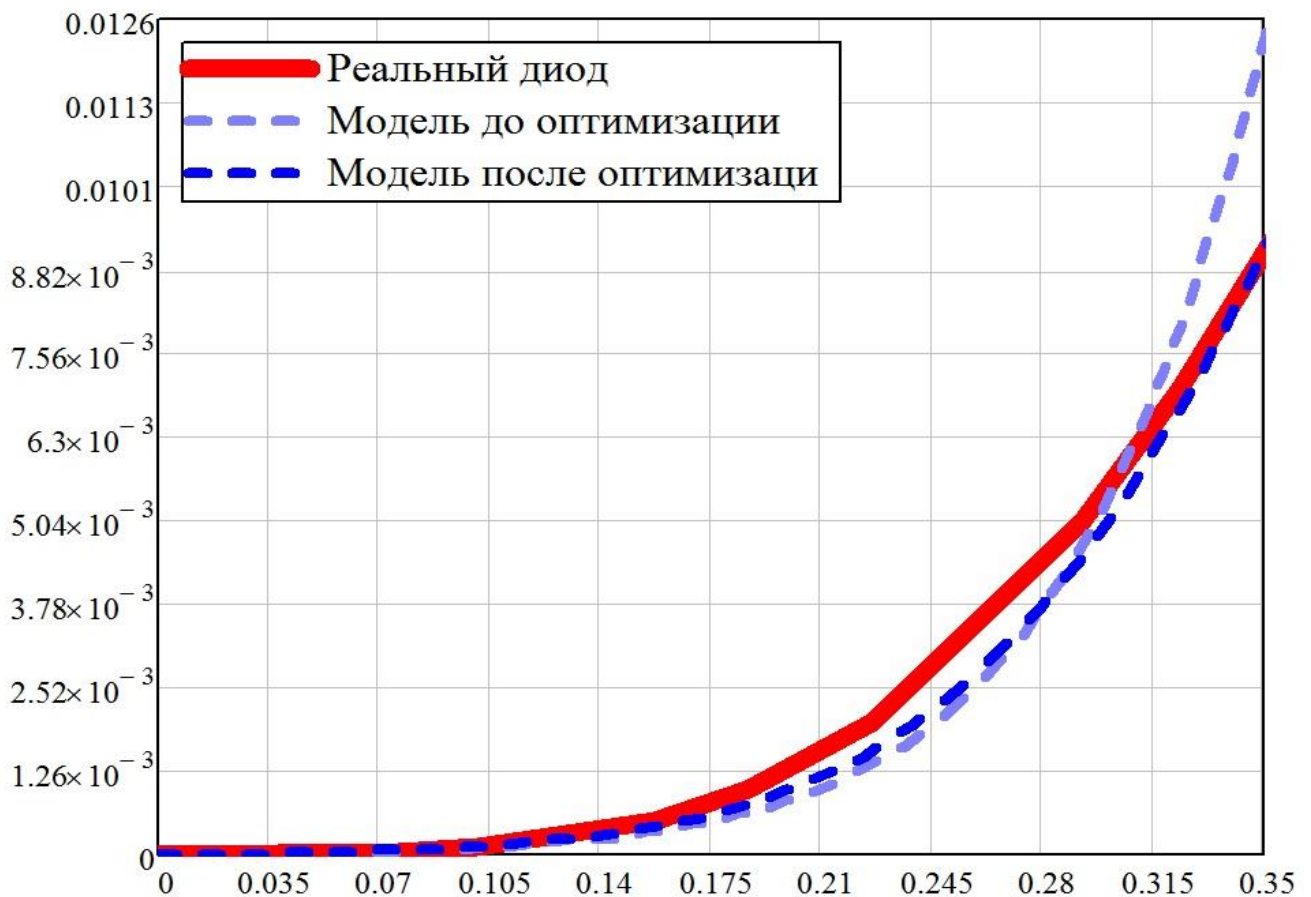
Подп. и дата

Инв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Трубкинов			
Пров.	Загидуллин			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				



## Сравнение ВАХ диода и модели



**Итог:** в процессе выполнения практикума мы научились создавать, настраивать и заносить в базу данных различные модели диодов. В ходе работы мы использовали программное обеспечение Micro-Cap 9 и MathCAD 14. Полученные навыки мы продемонстрировали сначала на пробном образце, взятом из готовой базы Micro-Cap 9, чтобы впоследствии сравнить полученные результаты, а затем на германиевом диоде Д311, который мы исследовали на лабораторной работе в зале ОРЭ. В качестве результатов работы были приведены различные графики, в том числе и графики вольтамперных характеристик, чтобы наглядно можно было увидеть расхождение реальных и моделируемых объектов.

### Лабораторный практикум №1

Полупроводниковый диод

Вариант №19

Лит	Лист	Листов
	14	15
МГТУ им. Н.Э.Баумана группа РЛ1-43		

