



**«Московский государственный технический
университет
имени Н.Э. Баумана»
(МГТУ им.Н.Э. Баумана)**

Факультет РЛ

Кафедра РЛ1 «Радиоэлектронные системы и устройства»

Домашнее задание №1

по курсу «Электроника»

Исследование вольт-амперных характеристик полупроводникового диода

Вариант № 27

Выполнил студент группы РЛ-41 Иванов В.В.

Преподаватель Крайний В.И.

Москва 2020

Расчет параметров модели заданного диода

Заданный диод Д102 ($BV=199.8$ $CJO=32.42p$ $FC=.5$ $IBV=344.9n$ $IKF=.1402$

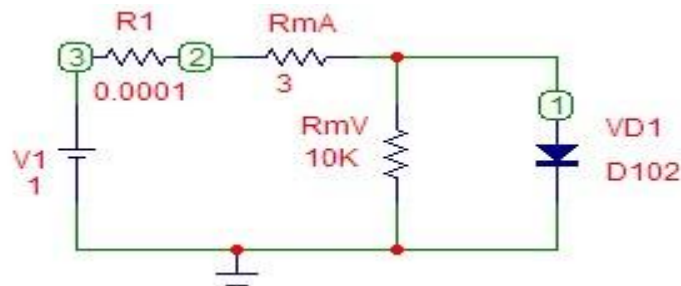
I

S

Из справочника [1] находим паспортные данные диода Д102: Диод кремниевый p точечный, $I_{пр.мах} = 30$ мА, $U_{обр.мах} = 50$ В.

I

S Схема измерительного стенда для исследования прямой ветви ВАХ^R полупроводникового диода (файл VAR2021.CIR) и



и

V_{R1} – внутреннее сопротивление источника V1; R_{mA} , R_{mV} – внутренние сопротивления миллиамперметра и милливольтметра соответственно. При прямом включении

сопротивление диода мало по сравнению с R_{mV} , поэтому миллиамперметр включен последовательно с диодом и вольтметром.

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

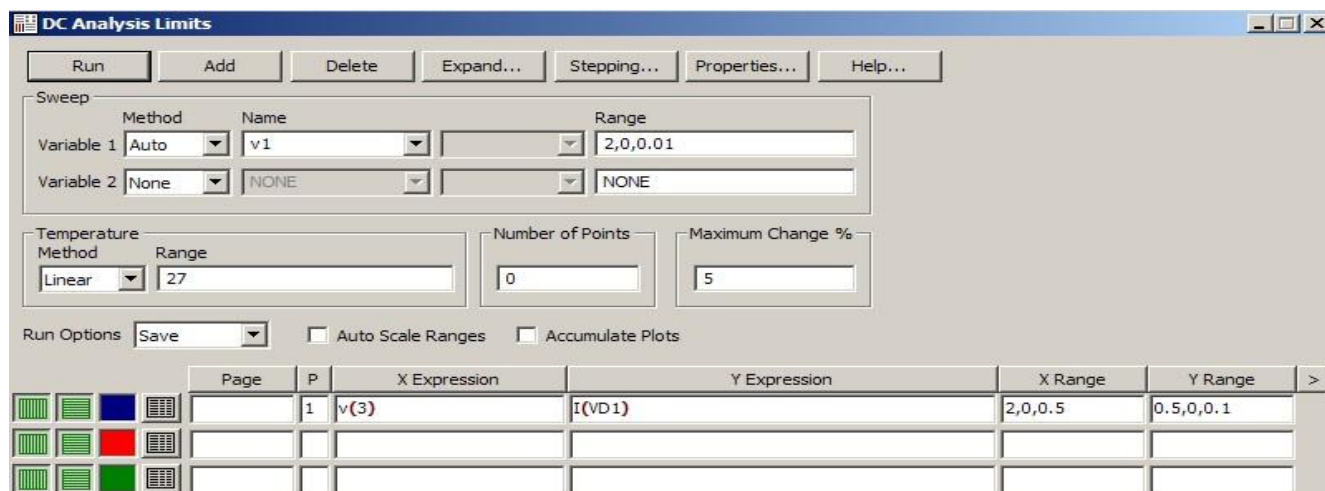
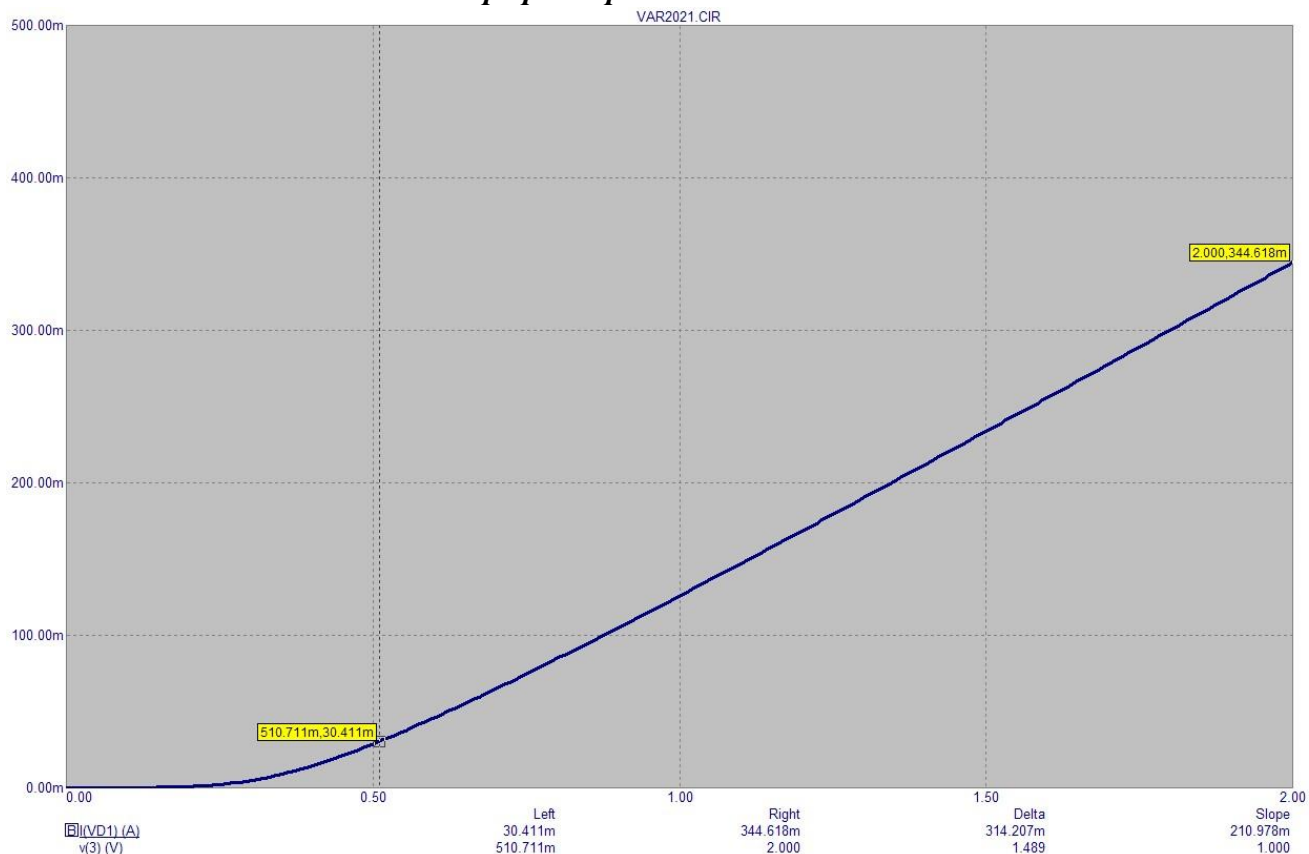


График прямой ветви ВАХ



Проводим многовариантный анализ (степпинг) для $R_{mV} = 1K..10K$, $R_{mA} = 1..10$ Ом. Окно задания параметров следующее:

Stepping

✓ 1:RMV 2: 3: 4: 5: 6: 7: 8: 9: 10: 11: 12: 1 ◀ ▶

Step What: **RMV** Value: Value

From: 1K

To: 10K

Step Value: 1K

Step It: ☒ Yes ☐ No

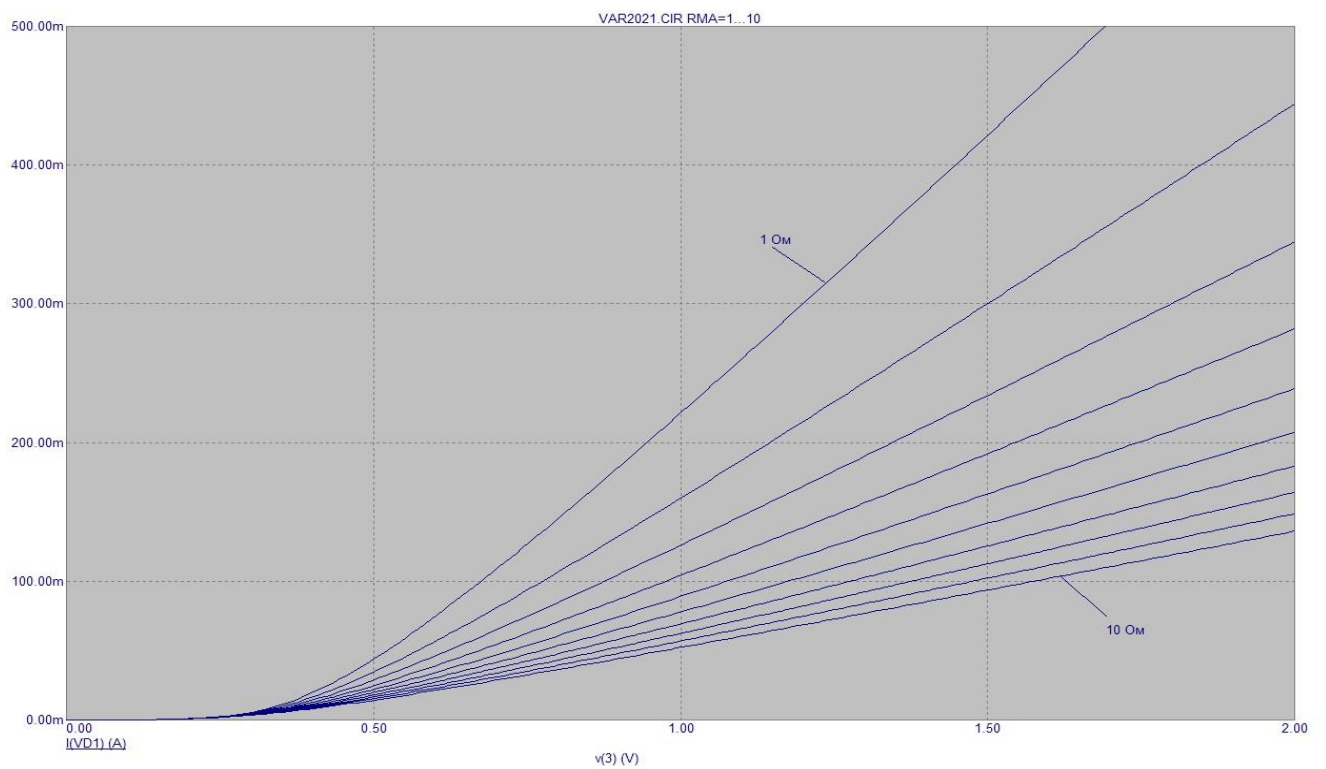
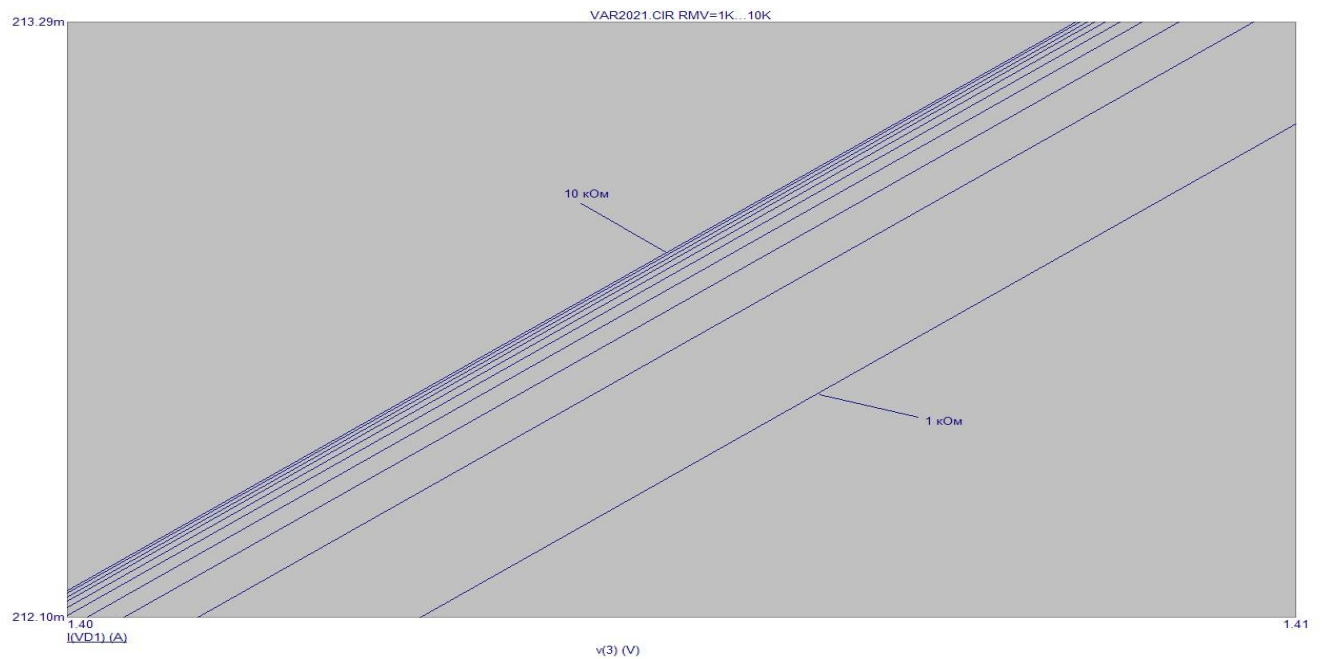
Method: ☒ Linear ☐ Log ☐ List

Parameter Type: ☒ Component ☐ Model ☐ Symbolic

Change: ☐ Step all variables simultaneously ☒ Step variables in nested loops

All On All Off Default OK Cancel Help...

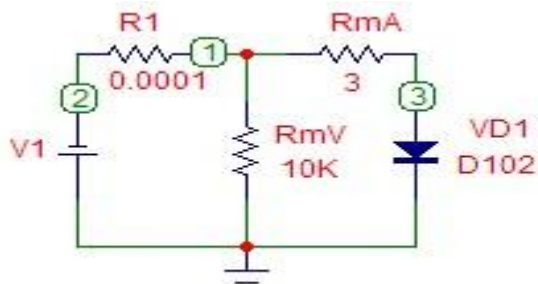
Графики ВАХ следующие:



Графики расположены очень близко друг к другу поскольку сопротивления R_{mV} и диод включены параллельно и $R_{\text{диода}} \ll R_{mV}$. Для $R_{mA}=1 \text{ Ом} \dots 10 \text{ Ом}$

При увеличении величины сопротивления R_{mA} ВАХ смещается из-за увеличения падения напряжения на R_{mA} .

Схема измерительного стенда для исследования обратной ветви ВАХ полупроводникового диода (файл *VAR2022.CIR*).



Окно задания параметров следующее:

DC Analysis Limits

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

Sweep

Variable	Method	Name	Range
Variable 1	Auto	V1	15,0,1
Variable 2	None	NONE	NONE

Temperature

Method	Range
Linear	27

Number of Points: 11

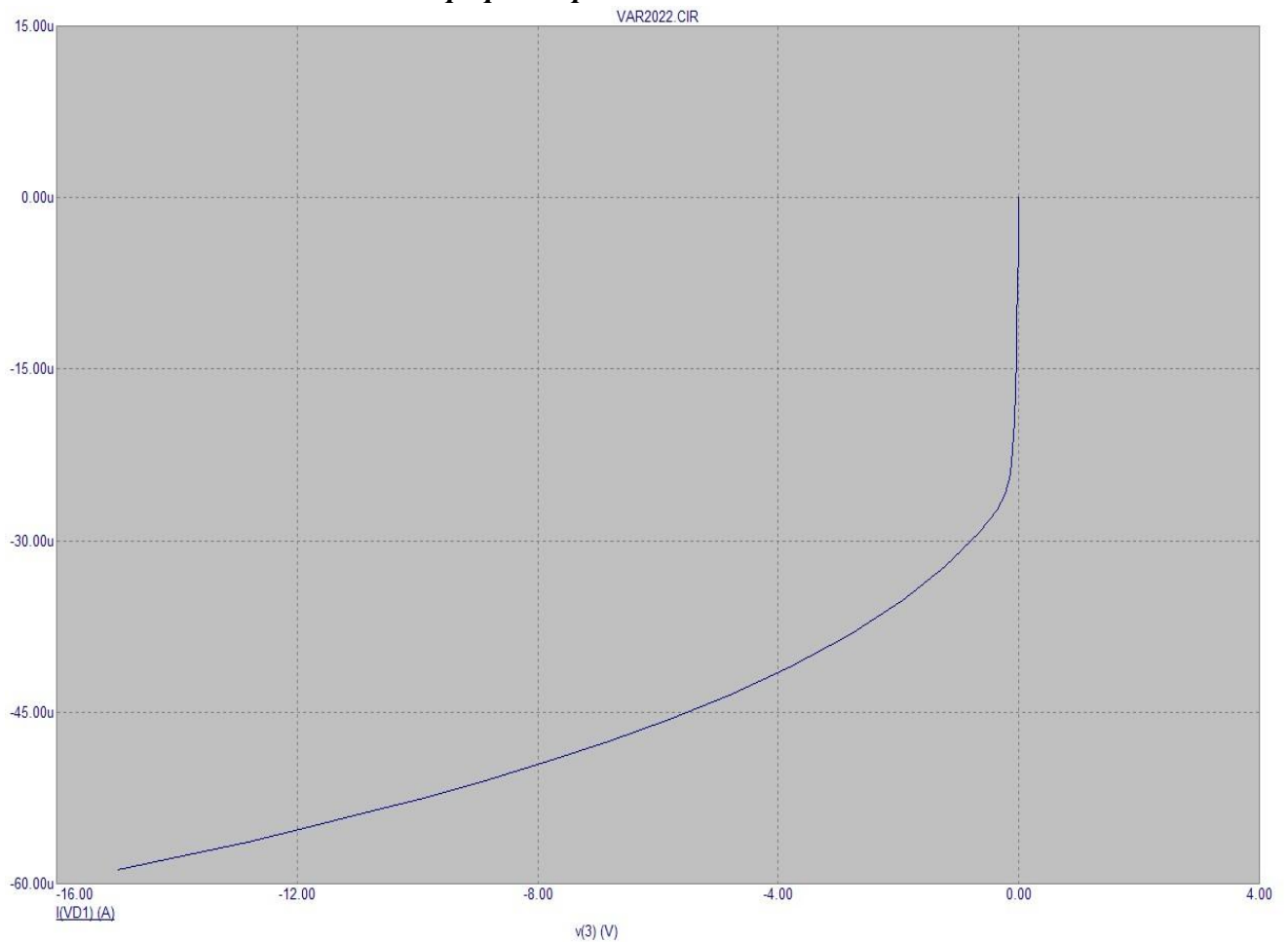
Maximum Change %: 5

Run Options: Save ☒ Auto Scale Ranges ☐ Accumulate Plots

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
1	1	v(3)	I(VD1)	4,-16,4	1.5e-5,-6e-5,1.5

При обратном включении сопротивления диода и вольтметра очень велики, вольтметр теперь включается параллельно с последовательным соединением диода и миллиамперметра.

График обратной ветви ВАХ



Рассчитаем основные параметры заданного диода в программе Mathcad. Для этого воспользуемся функцией Numeric Output программы сделаем формат числовых данных Decimal, а в файле с расширением .dno сотрем всю текстовую информацию. Далее с помощью функции

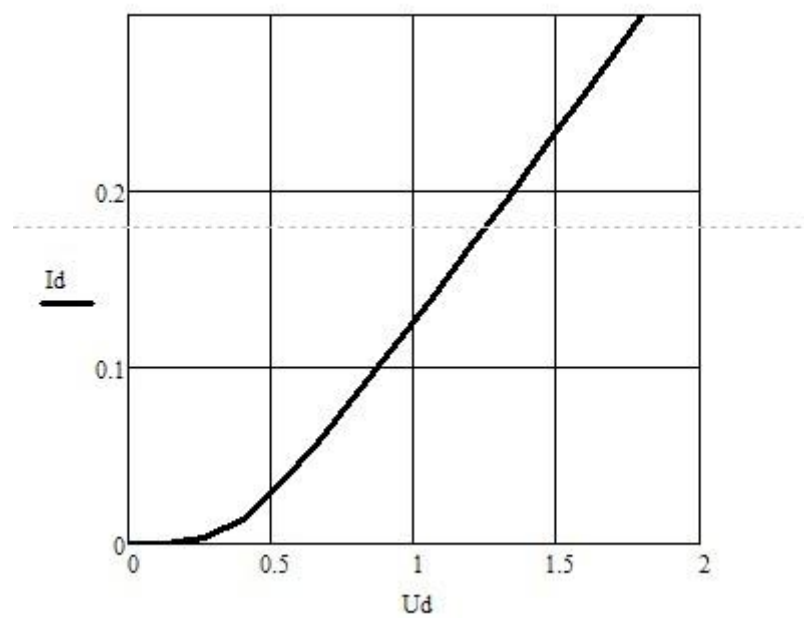
```
VAX READPRN("C:\MC9\DATA\VAR2021.DNO")
```

Ud Id

VAX

	0	1
0	0	0
1	0.133	0
2	0.267	$3 \cdot 10^{-3}$
3	0.4	0.014
4	0.533	0.034
5	0.667	0.058
6	0.8	0.085
7	0.933	0.112
8	1.067	0.14
9	1.2	0.169
10	1.333	0.197
11	1.467	0.227
12	1.6	0.256
13	1.733	0.285
14	1.867	0.315
15	2	0.345

$U_d := VAX^{(0)}$ V
 $I_d := VAX^{(1)}$ A
 $i1 := 8$
 $i2 := 10$
 $i3 := 14$
 $i4 := 15$
 $F_t := 0.1$
 $I_s := 10^{-6}$
 $N := 1.0$
 $R_s := 1.3$



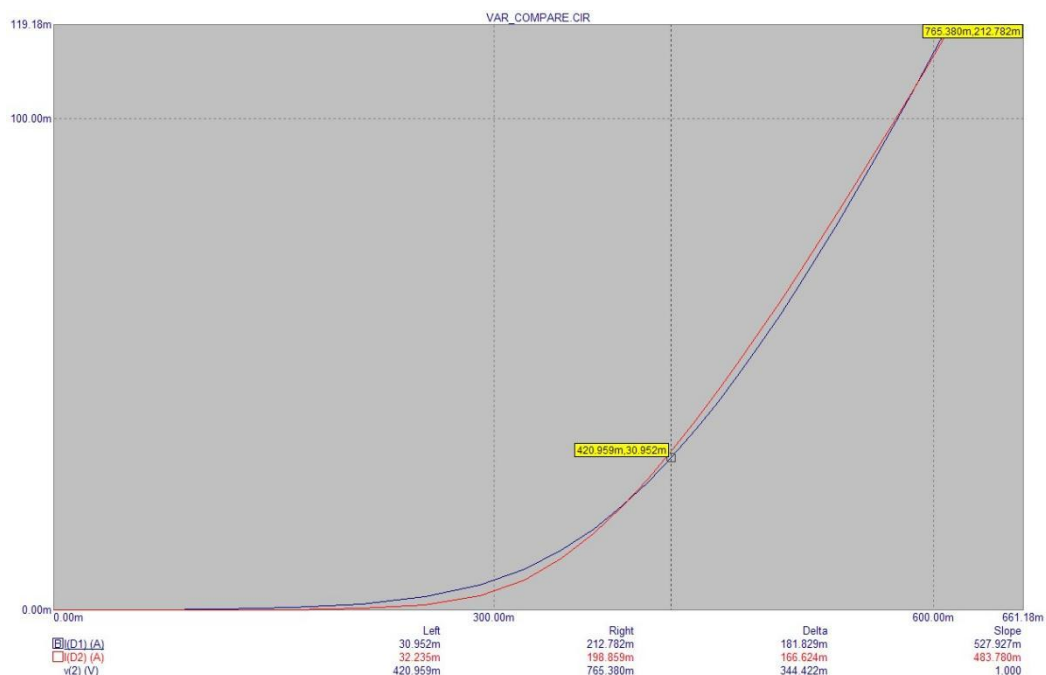
Расчет параметров модели диода проводился путем решения системы нелинейных уравнений с помощью блока функций “Given-Minerr”. Выводя точки графика прямой ветви ВАХ диода и подставляя их в расчетные формулы, с помощью функции “Given-Minerr” получаем параметры модели полупроводникового диода.

Далее в программе Micro-Cap в библиотеке SOVDIOD.LIB сформируем модель с параметрами рассчитанного диода.

```
.model D102 D(Is=3.525p Rs=1.32 Ikf=.1402 N=1 Xti=3 Eg=1.11
Cjo=32.42p M=.2894 Vj=.75 Fc=.5 Isr=24.36u Nr=2 Bv=50
Ibv=344.9n Tt=2.164u)
```

```
.model D102avgv D(Is=0.0228u Rs=4.227 Ikf=.1402 N=1.065 Xti=3
Eg=1.11 Cjo=32.42p M=.2894 Vj=.75 Fc=.5 Isr=24.36u
Nr=2 Bv=50 Ibv=344.9n Tt=2.164u)
```

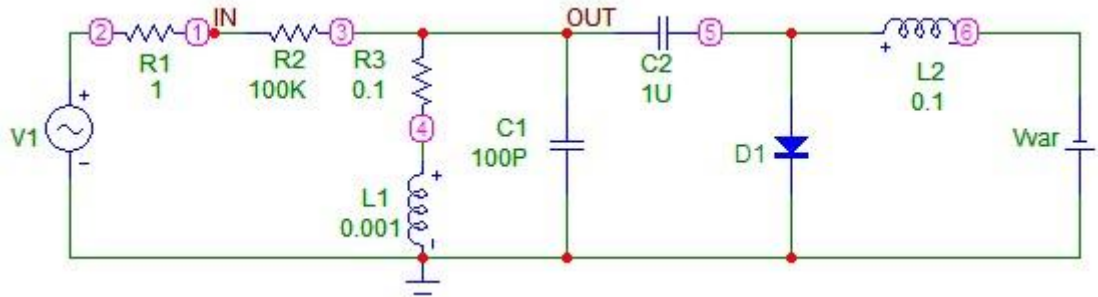
В файле Micro-Cap VAR_COMPARE.CIR проверяем схождение характеристик. С учетом того, что для рассматриваемого диода $I_{пр.max} =$ кривые.



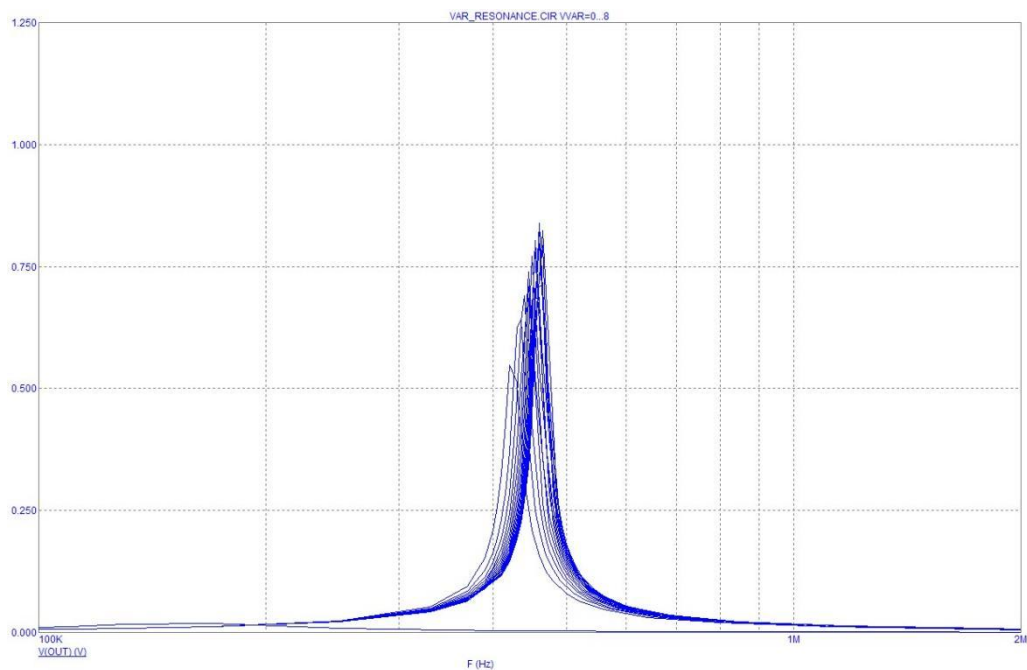
Относительная погрешность составляет

что является приемлемым, так как меньше 10%.

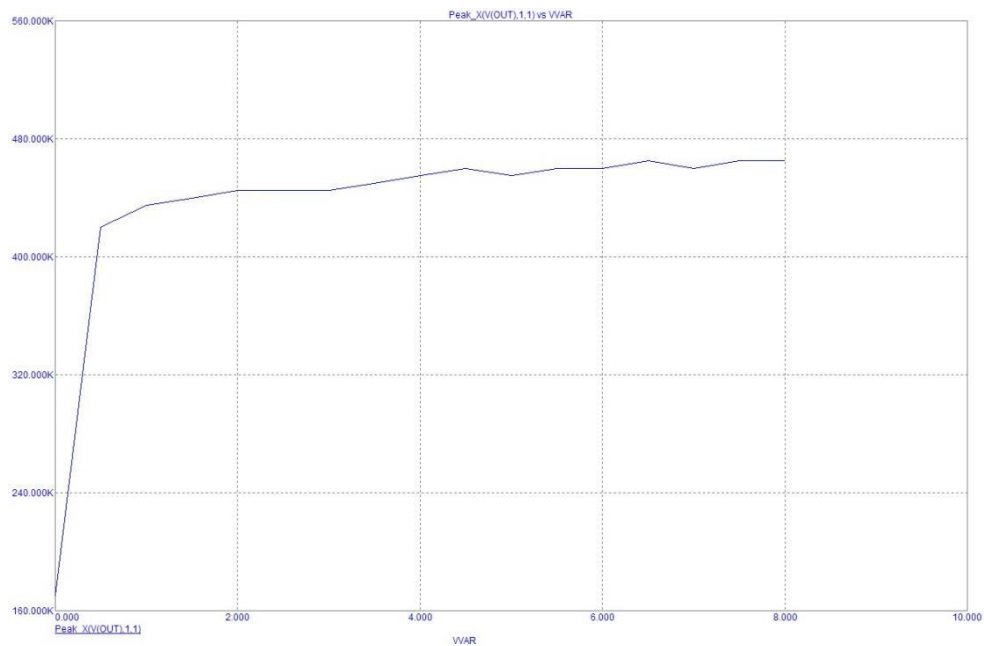
Для корректировки барьерной ёмкости диода при напряжении, равном нулю (C_{J0}), проведем эксперимент в MC9 для получения вольт-фарадной характеристики (ВФХ) (файл VAR_RESONANCE.CIR). Вычислим C_d (барьерная емкость диода) через значение $F_{рез}$ контура.



Проведя анализ, получим резонансные кривые:



Для построения зависимости резонансной частоты от выходного напряжения используем функцию PerformanceWindows для Peak_X в программе MC9. Получаем следующий график:



Теперь построим ВФХ средствами MathCAD, импортируя полученную в MC9 зависимость в MathCAD:

$MC9 := \text{READPRN}("C:\MC9\DATA\VAR_RESONANCE\text{Peak_X}(V(OUT),1,1) \text{ vs } VVAR.ANO")$

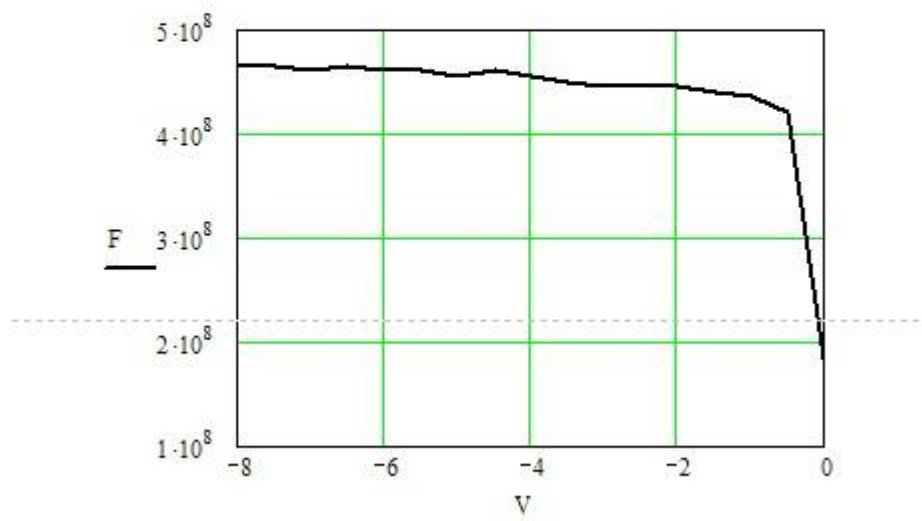
MC9 =

	0	1
0	0	$1.7 \cdot 10^5$
1	0.5	$4.2 \cdot 10^5$
2	1	$4.35 \cdot 10^5$
3	1.5	$4.4 \cdot 10^5$
4	2	$4.45 \cdot 10^5$
5	2.5	$4.45 \cdot 10^5$
6	3	$4.45 \cdot 10^5$
7	3.5	$4.5 \cdot 10^5$
8	4	$4.55 \cdot 10^5$
9	4.5	$4.6 \cdot 10^5$
10	5	$4.55 \cdot 10^5$
11	5.5	$4.6 \cdot 10^5$
12	6	$4.6 \cdot 10^5$
13	6.5	$4.65 \cdot 10^5$
14	7	$4.6 \cdot 10^5$
15	7.5	$4.65 \cdot 10^5$

Строим график зависимости резонансной частоты от обратного напряжения.

$$F := 1000 \cdot MC9^{(1)}$$

$$V := -MC9^{(0)}$$

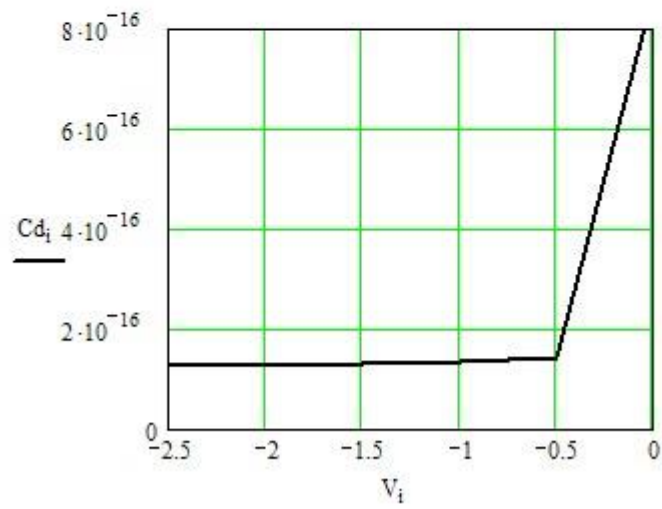


Далее рассчитываем емкость диода и строим график ее зависимости от обратного напряжения (вольт-фарадная характеристика).

$$Ck := 100^{-12}$$

$$Lk := 10^{-3} \qquad i := 0..5$$

$$Cd_i := \left(\frac{-1}{4}\right) \cdot \frac{\left[4 \cdot Lk \cdot Ck \cdot \left(F_i\right)^2 \cdot \pi^2 - 1\right]}{Lk \cdot \left(F_i\right)^2 \cdot \pi^2}$$



$$M := 0.3$$

$$CJO := 0.2 \cdot 10^{-10}$$

$$VJ := 0.75$$

Given

$$Cd_1 = CJO \cdot \left(\frac{VJ}{VJ + |V_1|}\right)^{0.3}$$

$$Cd_2 = CJO \cdot \left(\frac{VJ}{VJ + |V_2|}\right)^{0.3}$$

$$CJO \leq 10^{-10}$$

$$VJ < 1$$

$$\left(\frac{VJ}{CJO}\right) := \text{MinErr}(VJ, CJO)$$

$$\left(\frac{VJ}{CJO}\right) = \left(\frac{0.75}{2 \times 10^{-11}}\right)$$

В итоге прописываем эту емкость в модели полученного диода.

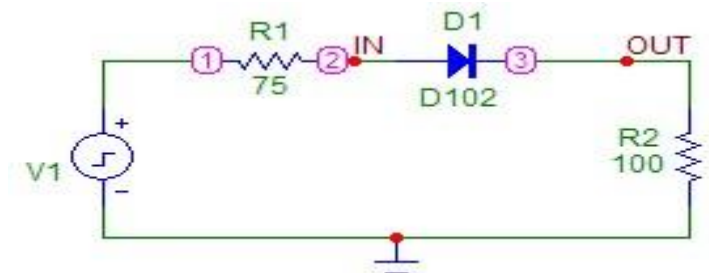
m
o

d

Для исследования импульсных свойств диодае используем файл
VAR_TT.CIR. 1

D

Схема для исследования импульсных свойств диодаа



V

u

R

VP

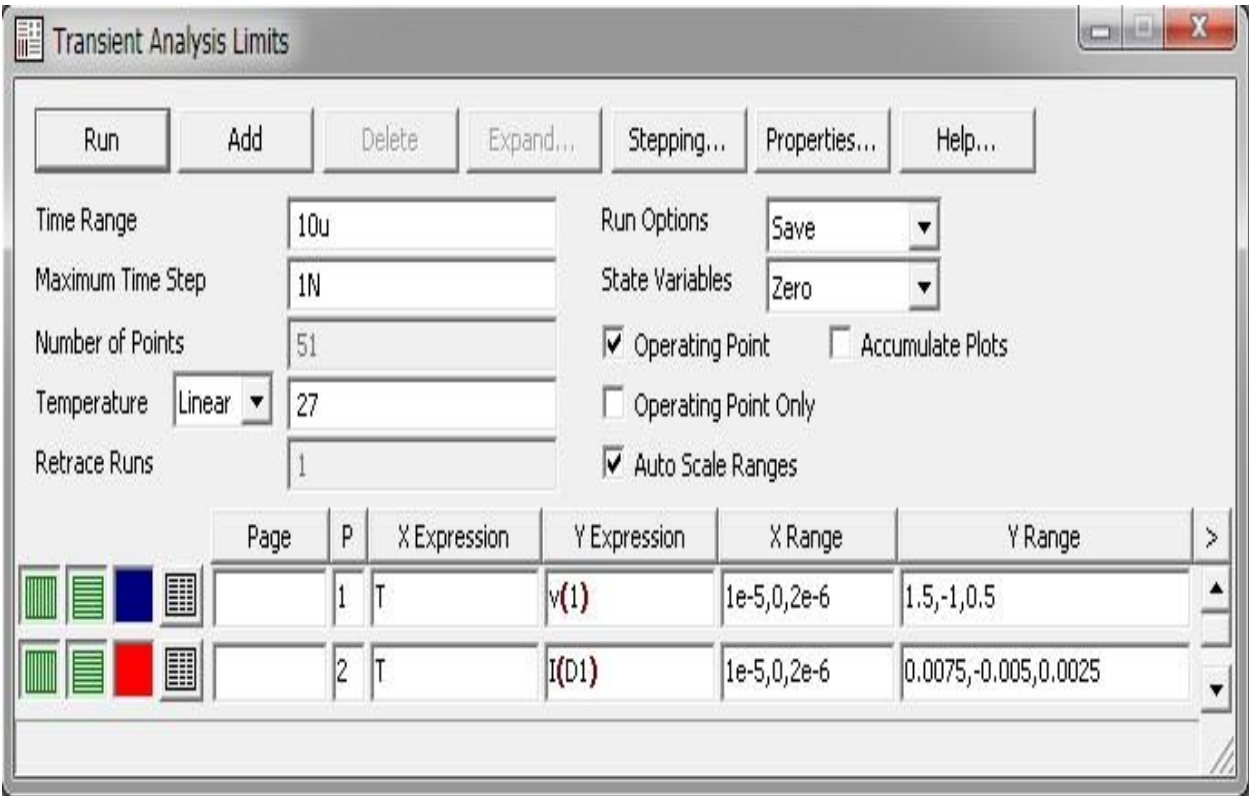
s

-RU I г Rвнутреннее сопротивление генератора;
R2- нагрузка.

eU k нP f eU Диалоговое N окно задания параметров

с
л
е
д
у
к
п
е
е
:
р

X
a



Г
u

тор

импульс

ны

х

си

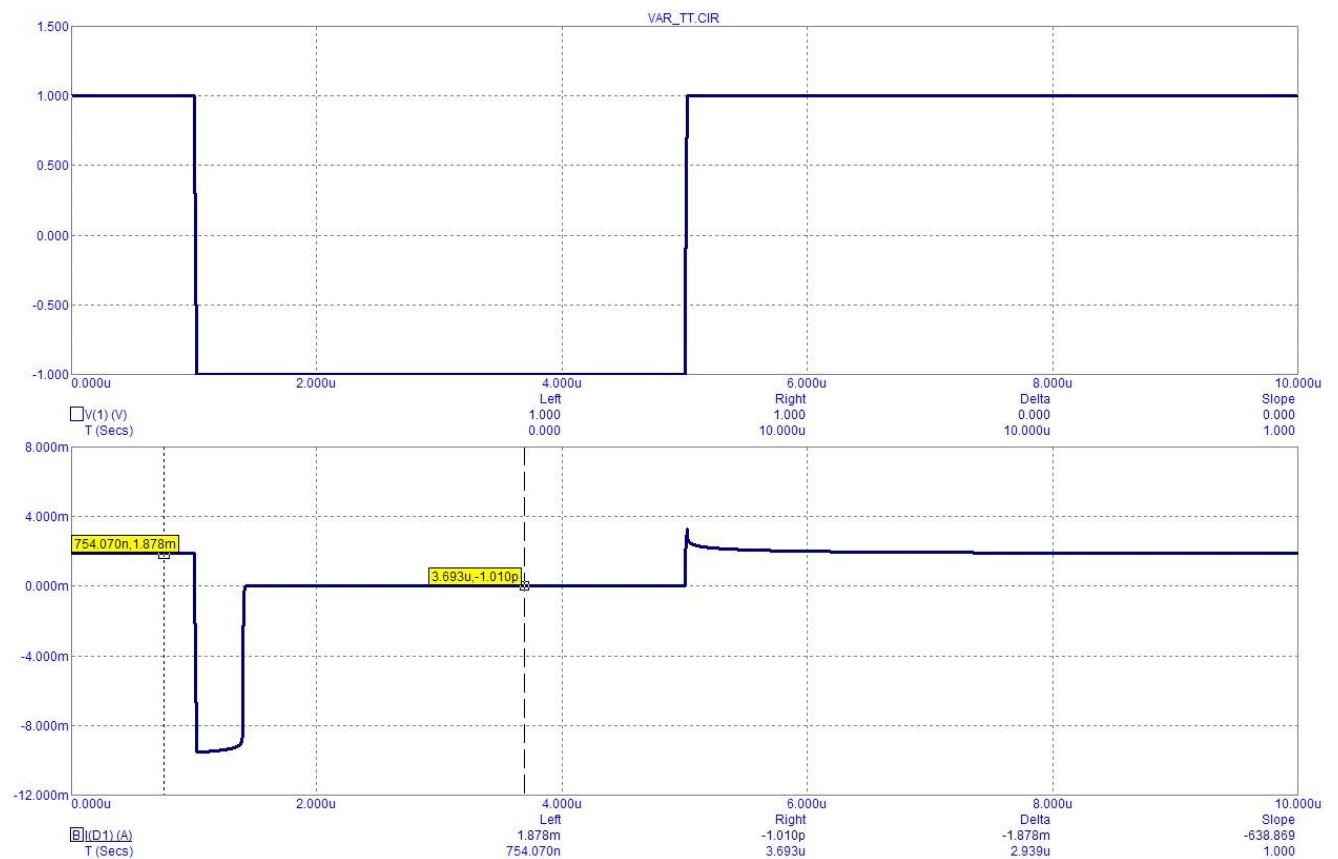
гн

а Nл го Вв v

Временные диаграммы

входного напряжения и

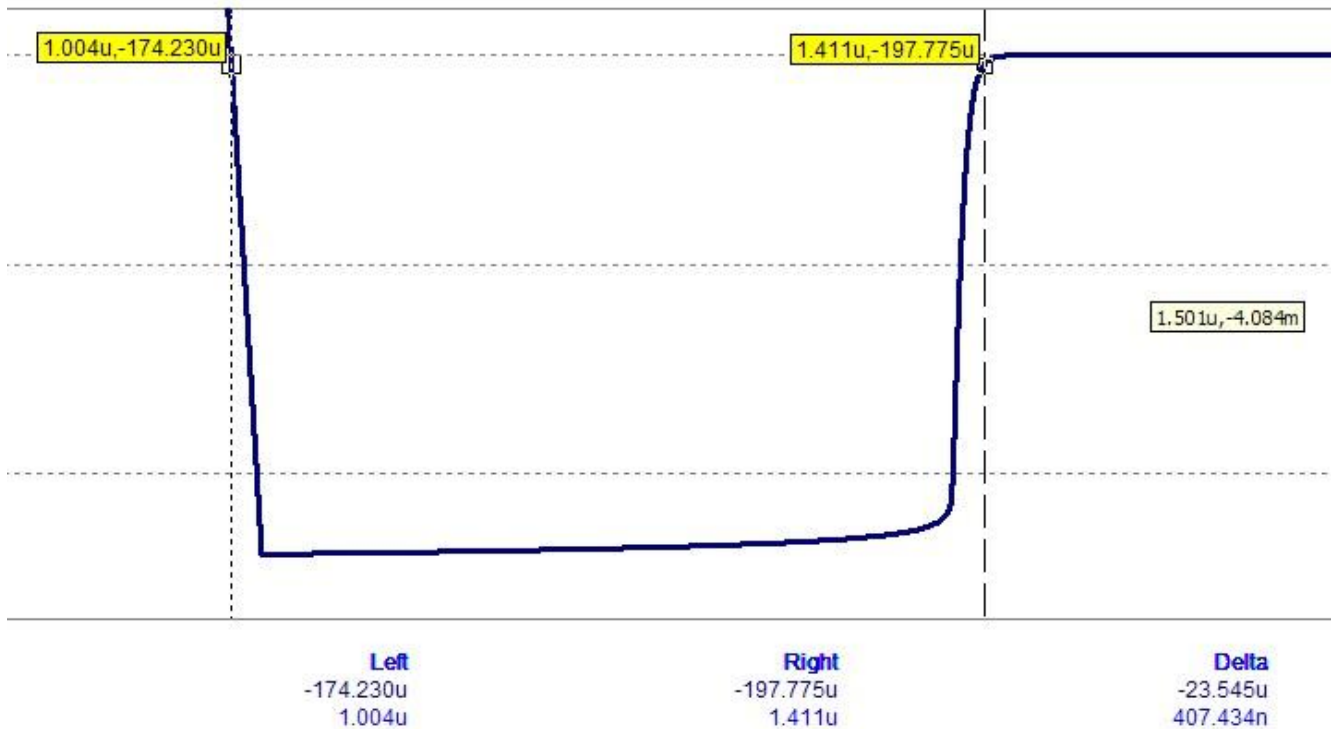
тока в нагрузке.



Время восстановления — время, при котором $I_{обр} = 0.1 I_{пр}$.

ТТ

— время переноса заряда или среднее время жизни носителей.



Из временных диаграмм получаем: $t_{\text{вос}}=407\text{n} \Rightarrow TT=t_{\text{вос}}*1.6=651.2\text{n}$.
 Прописываем значение параметра TT в модели полученного диода.

m
o
d

Расчет параметров модели диода, исследуемого на лабораторных работах

Исследовался диод атипа Д7Ж со следующими данными [1]:

v

Диод германиевый сплавной, металлостеклянный корпус. $F_{\text{max}}=2.4\text{кГц}$, g

$I_{\text{пр.ср}}=300\text{мА}$, $U_{\text{обр.макс}}=200\text{В}$. v

Измеренные на лабораторных работах данные занесены в таблицы: D

I

s u Таблица 1. Прямая
ветвь.

I_f, A							
V_f, V		s I					

I_f, A		k						R
V_f, V		f						
		N						

X

t

i

E

Таблица 2. Обратная ветвь.

I_d, mA	u	$16.7gu$	$17u$	$17.3u$	$17.5u$
V_{rev}, V	2.1	4 C	6	8	10

j

I_d, mA	$18.2u$	$19.3ou$	$20.2u$	$21.1u$	$22u$
V_{rev}, V	20	40 p	60	80	100

M

V

j

$F \text{ } c$

I

s

r

u

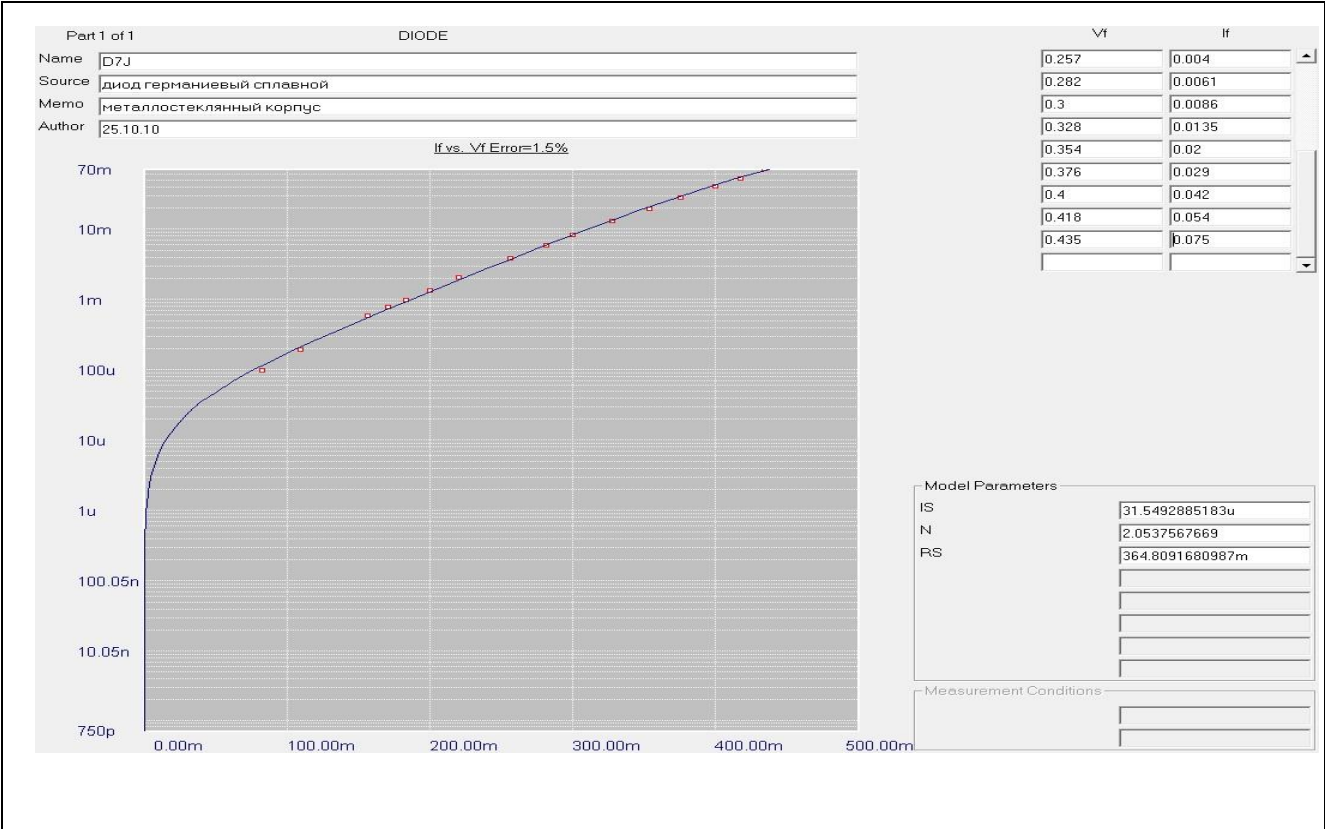
N

r

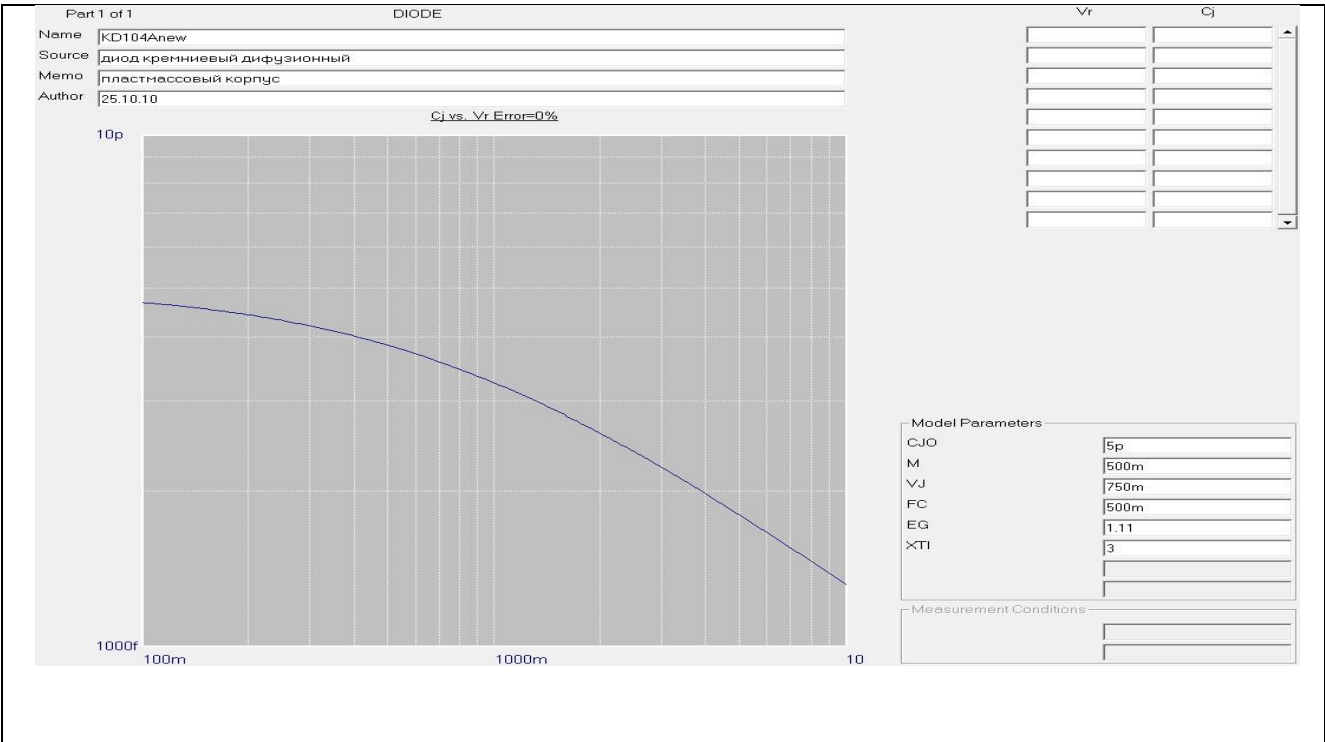
B

Расчет параметров модели в программе Model

Окно расчетов 1



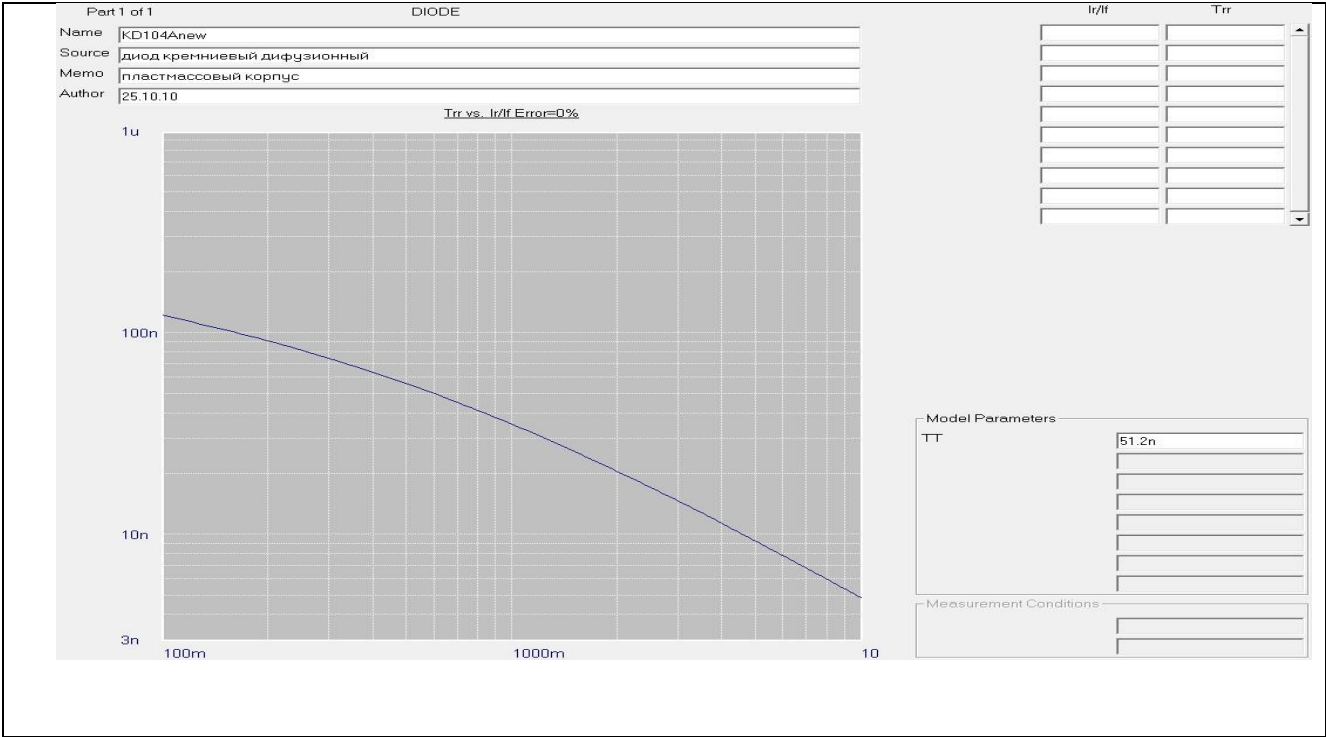
Окно расчетов 2



Окно расчетов 3

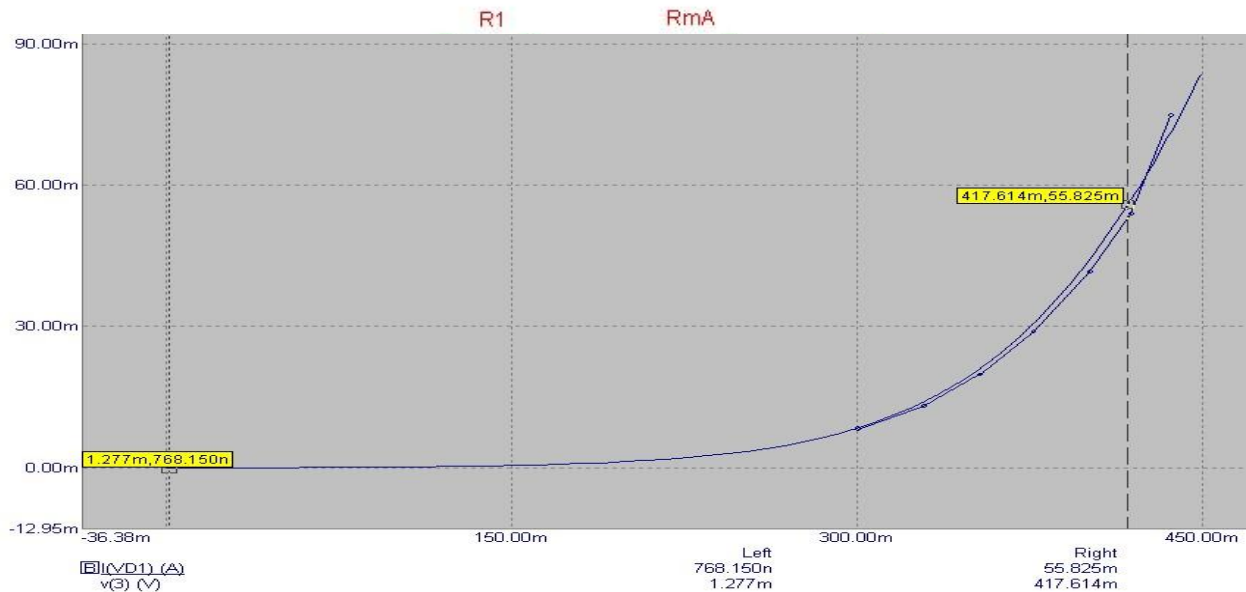


Окно расчетов 4



Создаем SPICE файл, и прописываем имя файла в библиотеку (D7J.lib). Сравнение ВАХ лабораторного диода и диода, полученного в программе Model, проводим в следующей схеме.

Строим ВАХ прямой ветви:



На графике ВАХ диода, полученного в программе Model, по точкам (используя графический редактор программы Microcar) строим график лабораторного диода и вычисляем погрешность.

Рассчитаем относительную погрешность:

$$\Delta = (I_{D7ЖА} - I_{D7ЖАnew} / I_{D7ЖА}) * 100 \% =$$

Расхождение по току меньше 10%, следовательно, модель приемлема. Используя справочные данные, скорректируем значение BV.

В итоге получаем следующие параметры модели:

Параметры модели диода D7Ж_new скорректированные: IS=31.5u, N=2.05,

X

T

ВЫВОД: В ходе выполнения работы была изучена работа программ

I

математического анализа Mathcad и схемотехнического моделирования MicroE заданного в библиотеке полупроводникового диода, на виртуальных

G

измерительных стендах в программе MicroCar построены его входные и В

выходные характеристики, которые были импортированы в программу Mathcad
и на базе которых с помощью блока функций “Given-Mineer” решены
нелинейные уравнения и получены основные параметры модели диода. Далее в
формате SPICE была сформирована модель диода. Получена вольт-фарадная
характеристика и исследованы импульсные свойства диода. Изучена методика
измерения характеристик и расчета параметров модели диода, была доказана
правильность построения модели (относительная погрешность составила
характеристика германиевого диода Д7Ж, проведен расчет параметров
модели
этого диода в MicroCap с помощью программы MODEL и сформирована его
р модель. Расхождение графиков составило 3.3%.

Список использованных источников

1. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристры, оптоэлектронные приборы. Т
Справочник А.В. Баюков, А.Б. Гритцевич, А.А.Зайцев и др; Под общ. Ред. и
Н.Н.Горюнова – 3е изд., Перераб. – М. Энергоатомизад, 1972 -744с.
2. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7.-М.:
Горячая линия – Телеком,2003.-368 с.,ил.
3. Компьютер для студентов. Самоучитель. Быстрый старт. Под ред. В.Б.
Комягина: Учебное пособие - М.: Издательство ТРИУМФ, 2003 – 400с.:ил.