

**МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**Дисциплина электроника**

**Лабораторный практикум №1**

**по теме: «Полупроводниковые диоды»**

**Работу выполнил:**

**студентка группы ИУ7-34Б**

**Ильченко Ева**

**Работу проверил:**

## Оглавление

Оглавление.....	2
Цель практикума.....	3
Часть 1.....	4
Параметры диода.....	4
Получение ВАХ в программе Microcap.....	4
Расчет параметров диода в программе.....	7
Приближенный расчет параметров модели полупроводникового диода методом трех ординат.....	9
Построение вах заданной таблицей и функциональной зависимостью на одном графике.....	10
Часть 2.....	13
Получение цепи для вычисления емкости диода в программе Microcap.....	13
Вывод.....	20

## **Цель практикума**

Получение в программе схемотехнического анализа Microcap и исследование статических характеристик кремниевого полупроводникового диода с целью определения по ним параметров модели полупроводниковых диодов. Освоение программы Mathcad для расчёта параметров модели полупроводниковых приборов на основе данных экспериментальных исследований

## Часть 1

### Параметры диода

В данной работе применяется пятьдесят второй тип диода D2C168A. Характеристики диода представлены ниже в текстовом виде, взятые из вкладки "Text" программы Microcap.

```
.model D2C168A D(Is=31.47f Rs=9.494 Ikf=0 N=1 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=220p  
M=.5959 + Vj=.75 Fc=.5 Isr=2.035n Nr=2 Bv=6.848 Ibv=95.79m * Nbv=28  
Ibvl=3m Nbv1=120 + Tbv1=600u)
```

Рис. 1. Параметры диода на вкладке Text программы Microcap

### Получение ВАХ в программе Microcap

Для получения ВАХ диода на прямой ветви в программе Microcap 12 строим соответствующую цепь (см. рис. 2). Также строим цепь для обратной ветви (см. рис. 3)

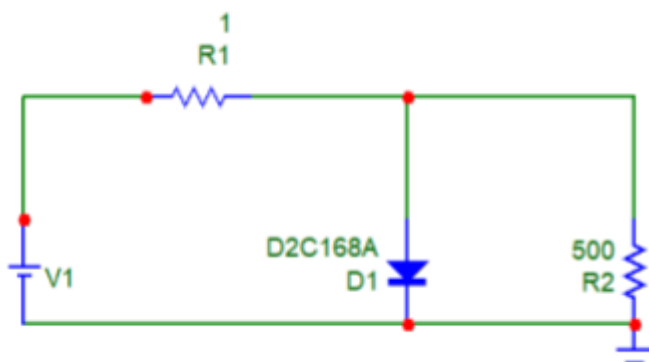


Рис. 2. Схема для снятия ВАХ с прямой ветви

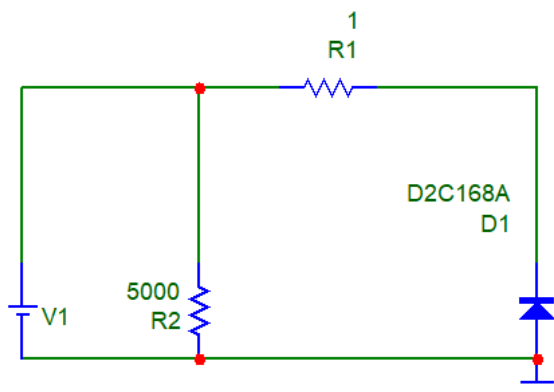


Рис. 3. Схема для снятия ВАХ с прямой ветви

Данный выбор схем объясняется следующими соображениями. Несмотря на то, что идеальных измерительных приборов не существует, всетаки 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.

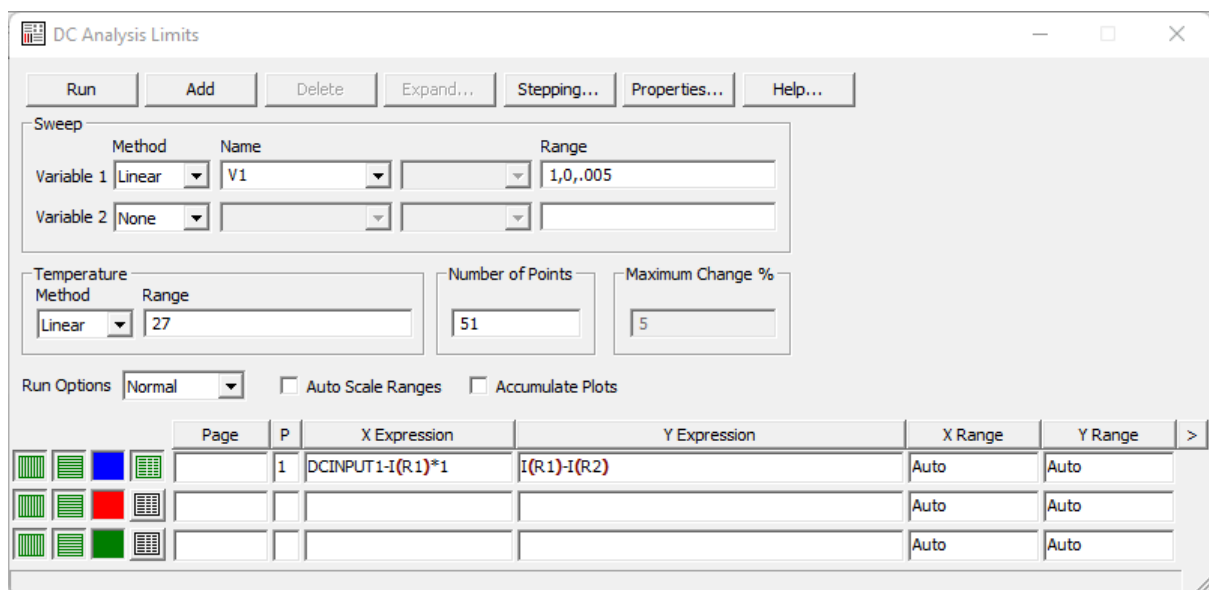


Рис. 4. Ввод формулы для прямой ветви

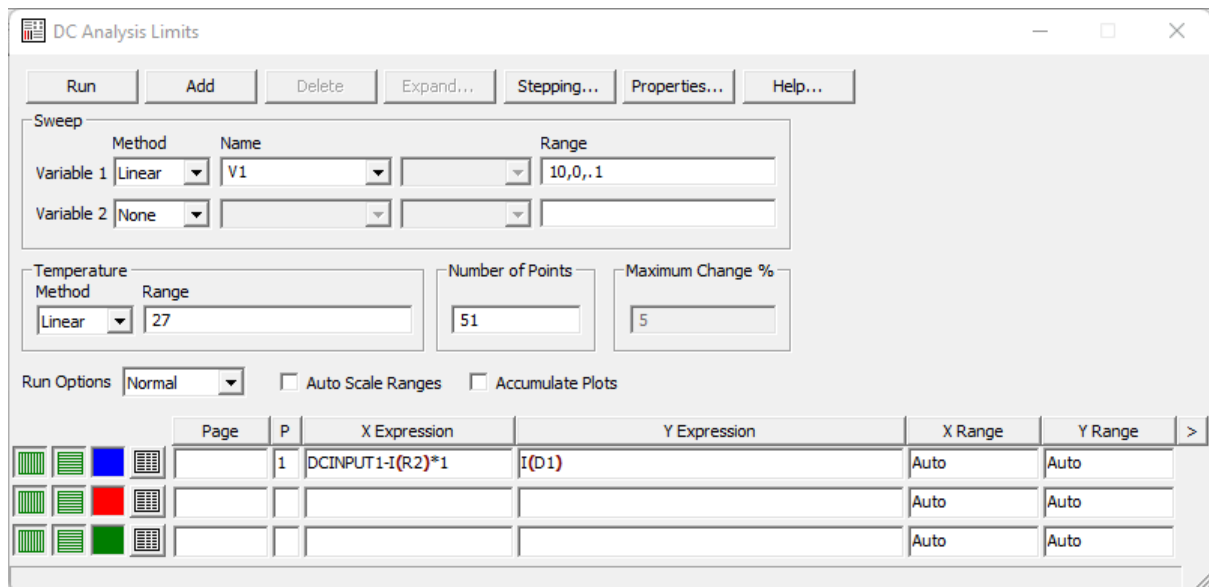


Рис. 5. Ввод формулы для обратной ветви

Где  $U_d = DCINPUT1 - I(R1) \cdot 1$ .  $DCINPUT1$  – значение изменяемого напряжения  $V1$ , в качестве которого используется напряжение источника  $V1$ . Ток через миллиамперметр определяется суммой двух токов – тока через диод и тока через милливольтметр. Поэтому для построения графика, связывающего ток диода с напряжением на диоде, используется выражение  $I_d = I(R1) - I(R2)$ . В результате получаем следующий график зависимости прямого тока от напряжения на диоде:

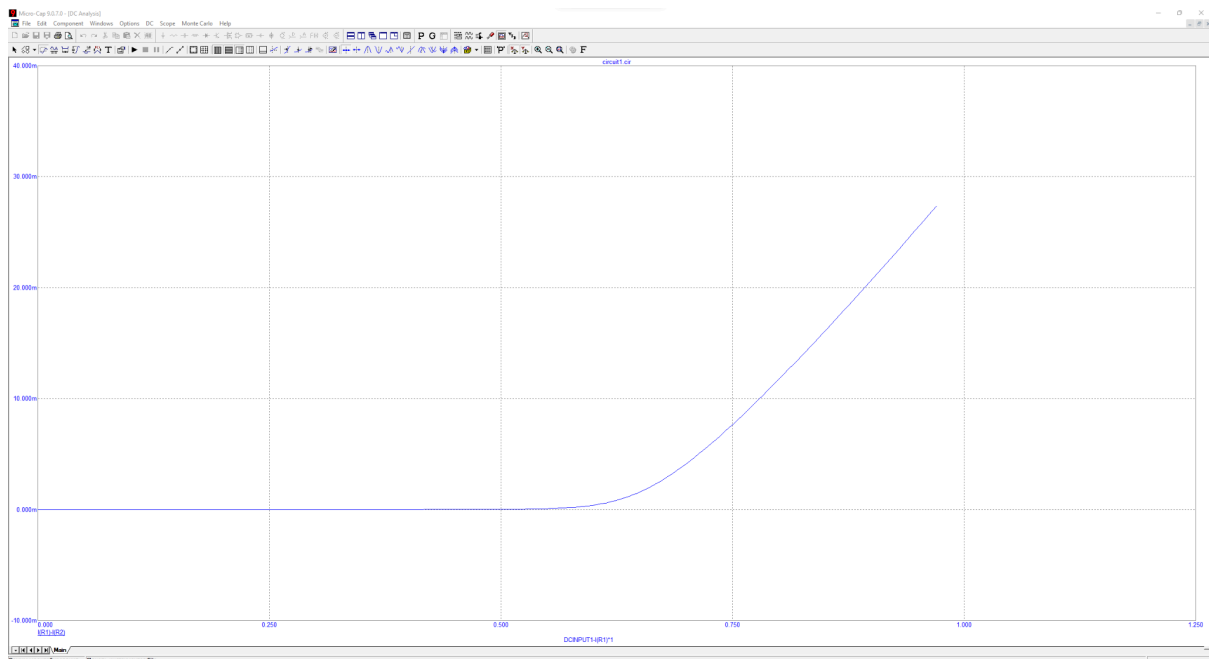


Рис. 6. Зависимость прямого тока от напряжения на диоде

В схеме определения обратного тока диода запись тока и напряжения на диоде меняются: поскольку ток через вольтметр с внутренним сопротивлением  $R_1$  значительно больше обратного тока диода, его надо исключить из измерений. При этом напряжение на амперметре очень мало (микро или нановольты), поскольку обратный ток диода очень мал

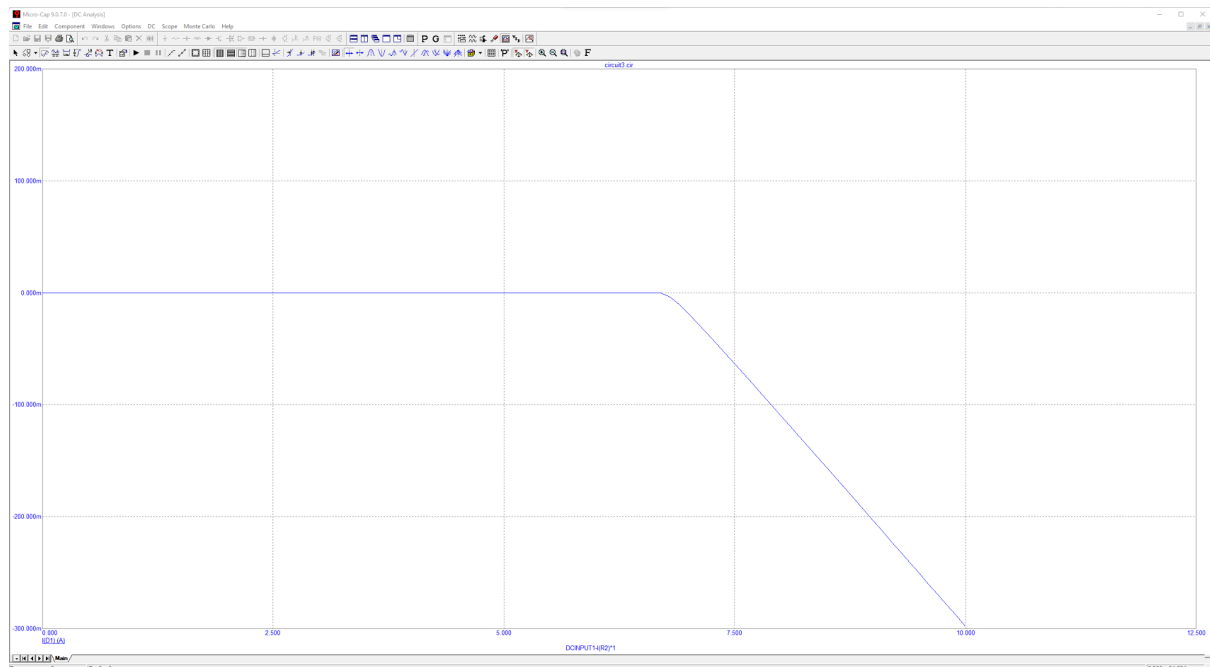


Рис. 7. Зависимость обратного тока от напряжения на диоде

Необходимо вывести только числовую информацию о прямом токе взаимодействия с программой MCAD. Для этого настраиваем опции вывода программы таким образом, чтобы файл содержал только численные результаты расчета прямого тока.

После выполнения всех настроек требуется проверить состояние файла, предназначенного для передачи в MCAD. Файл не должен содержать заголовка, а значения напряжения и тока должны быть выражены в десятичном виде. Путь к указанному файлу указан в заголовке.

### Расчет параметров диода в программе

Mathcad После импорта снятых показаний из программы Microcap в программу Mathcad и записи их в матрицу VAX, строим график на основе этой матрицы. Это позволит нам удобно работать с данными и их

анализировать. Построим график, используя матрицу VAX, чтобы визуально представить полученные данные. На графике будут отмечены выбранные трассировкой три точки, которые будут использоваться в методе трех ординат. Выбранные трассировкой точки на графике помогут нам определить три точки, необходимые для применения метода трех ординат. По этим точкам мы можем применить метод, чтобы получить значение функции в желаемой точке

$VAX^{(0)}$		0	$VAX^{(1)}$		0	$VAX$		0	1
	0	0		0	0		0	0	0
	1	0.02		$9 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-10}$		1	0.02	$9 \cdot 10^{-10}$
	2	0.04		$2.3 \cdot 10^{-9}$	$2.3 \cdot 10^{-9}$		2	0.04	$2.3 \cdot 10^{-9}$
	3	0.06		$4.2 \cdot 10^{-9}$	$4.2 \cdot 10^{-9}$		3	0.06	$4.2 \cdot 10^{-9}$
	4	0.08		$7 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$		4	0.08	$7 \cdot 10^{-9}$
	5	0.1		$1.1 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$		5	0.1	$1.1 \cdot 10^{-8}$
	6	0.12		$1.68 \cdot 10^{-8}$	$1.68 \cdot 10^{-8}$		6	0.12	$1.68 \cdot 10^{-8}$
	7	0.14		$2.51 \cdot 10^{-8}$	$2.51 \cdot 10^{-8}$		7	0.14	$2.51 \cdot 10^{-8}$
	8	0.16		$3.7 \cdot 10^{-8}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$		8	0.16	$3.7 \cdot 10^{-8}$
	9	0.18		$5.41 \cdot 10^{-8}$	$5.41 \cdot 10^{-8}$		9	0.18	$5.41 \cdot 10^{-8}$
	10	0.2		$7.88 \cdot 10^{-8}$	$7.88 \cdot 10^{-8}$		10	0.2	$7.88 \cdot 10^{-8}$
	11	0.22		$1.143 \cdot 10^{-7}$	$1.143 \cdot 10^{-7}$		11	0.22	$1.143 \cdot 10^{-7}$
	12	0.24		$1.652 \cdot 10^{-7}$	$1.652 \cdot 10^{-7}$		12	0.24	$1.652 \cdot 10^{-7}$
	13	0.259		$2.383 \cdot 10^{-7}$	$2.383 \cdot 10^{-7}$		13	0.259	$2.383 \cdot 10^{-7}$
	14	0.279		$3.433 \cdot 10^{-7}$	$3.433 \cdot 10^{-7}$		14	0.279	$3.433 \cdot 10^{-7}$
	15	...		...	...		15	0.299	...

Рис. 8. Матрица VAX Рис 12. Столбцы матрицы VAX, По оси X (напряжение) – VAX 0, по оси Y (ток) – VAX 1

Получаем график VAX в Mathcad.

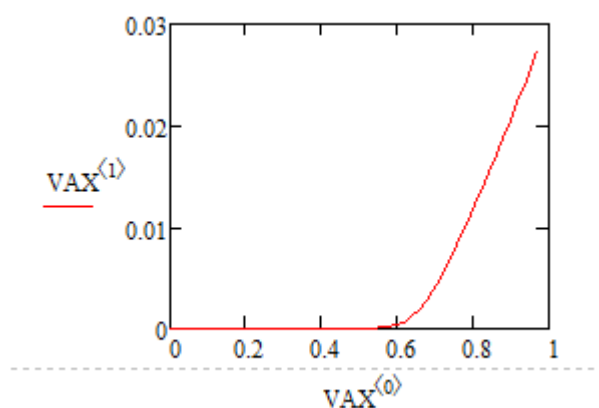


Рис. 9. график VAX в Mathcad.



### Приближенный 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.

$$U_d = I_d * R_b + N * F_t * \ln\left(\frac{I_d + I_o}{I_o}\right) \quad I_d = I_o * \left(\exp\left(\frac{U_d - I_d * R_b}{N * F_t}\right) - 1\right)$$

Простейшая модель диода с учётом объёмного сопротивления области базы описывается уравнением тока диода: где  $I_o$  – обратный ток перехода,  $R_b$  – объёмной сопротивление базы,  $N * F_t$  – тепловой потенциал. Для определения трёх неизвестных  $R_b$ ,  $N * F_t$  и  $I_o$  следует взять три экспериментальных отсчёта (точки) статической характеристики, получить и решить систему из трёх нелинейных уравнений.

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

$$\begin{aligned}
Id3 &:= \max(VAX^{(1)}) & Id3 &= 0.027 \\
nMAX &:= \text{match}(Id3, VAX^{(1)}) & nMAX &= (50) \\
Ud3 &:= (VAX^{(0)})_{50} & Ud3 &= 0.971 \\
nId1 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{4}, VAX^{(1)}\right) & nId1 &= \begin{pmatrix} 37 \\ 38 \end{pmatrix} \\
nId2 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{2}, VAX^{(1)}\right) & nId2 &= (42) \\
Ud1 &:= \text{linterp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{4}\right) & Ud1 &= 0.739 \\
Ud2 &:= \text{linterp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{2}\right) & Ud2 &= 0.822 \\
Id1 &:= \frac{Id3}{4} & Id1 &= 6.847 \times 10^{-3} \\
Id2 &:= \frac{Id3}{2} & Id2 &= 0.014 \\
Rb &:= \left(\frac{Ud1 - 2 \cdot Ud2 + Ud3}{Id1}\right) & Rb &= 9.459 \\
NFt &:= \frac{[(3 \cdot Ud2 - 2 \cdot Ud1) - Ud3]}{\ln(2)} & NFt &= 0.027 \\
Is0 &:= Id1 \cdot \exp\left[\frac{(Ud3 - 2 \cdot Ud2)}{NFt}\right] & Is0 &= 9.078 \times 10^{-14}
\end{aligned}$$

Рис. 10. Метод трех ординат

### Построение вах заданной таблицей и функциональной зависимостью на одном графике

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. В методе минимизации ошибки с использованием функции Minerr, мы определяем значения параметров, соответствующие графику VAX. Для этого, выбираем четыре точки на этом графике, которые

представлены в виде четырех строк в матрице VAX

$$\text{Rb} := 1 \quad \text{Is0} := 10^{-7} \quad \text{m} := 2 \quad \text{Ft} := 0.02$$

Given

$$0.63755 = 0.0011715 \cdot \text{Rb} + \ln\left(\frac{\text{Is0} + 0.0011715}{\text{Is0}}\right) \cdot \text{m} \cdot \text{Ft}$$

$$0.71355 = 0.0050182 \cdot \text{Rb} + \ln\left(\frac{\text{Is0} + 0.0050182}{\text{Is0}}\right) \cdot \text{m} \cdot \text{Ft}$$

$$0.84282 = 0.015493 \cdot \text{Rb} + \ln\left(\frac{\text{Is0} + 0.015493}{\text{Is0}}\right) \cdot \text{m} \cdot \text{Ft}$$

$$0.91596 = 0.022204 \cdot \text{Rb} + \ln\left(\frac{\text{Is0} + 0.022204}{\text{Is0}}\right) \cdot \text{m} \cdot \text{Ft} \quad +$$

$$\text{Diod\_P} := \text{Minerr}(\text{Is0}, \text{Rb}, \text{m}, \text{Ft})$$

$$\text{Diod\_P} = \begin{pmatrix} 1.262 \times 10^{-13} \\ 9.416 \\ 1.653 \\ 0.017 \end{pmatrix}$$

Рис. 11. Определение параметров диода с помощью Minerr()

Для визуализации графика, основанного на вычисленных с помощью функции Minerr параметров, мы можем использовать функцию Udiod(Idiod), которая объединяет ток диода и напряжение на нем. Этот последний график предназначен для наглядного сравнения исходной кривой, которая была получена на основе входных табличных данных, и теоретического графика модели, определенного с помощью формулы. Для создания этого графика необходимо ввести на нём переменные VAX(1) и U(Idiod). Данная информация будет представлена на графике с использованием запятой, что позволит наглядно отобразить оба значения. Таким образом, мы сможем увидеть, в какой степени исходные данные соответствуют модели и какие отличия могут возникнуть. Такое сопоставление графиков позволяет более подробно изучить связь между

теорией и практикой.

$$Rb1 := 1.2 \quad NFt1 := 0.0255 \quad Is01 := 22.7 \cdot 10^6$$

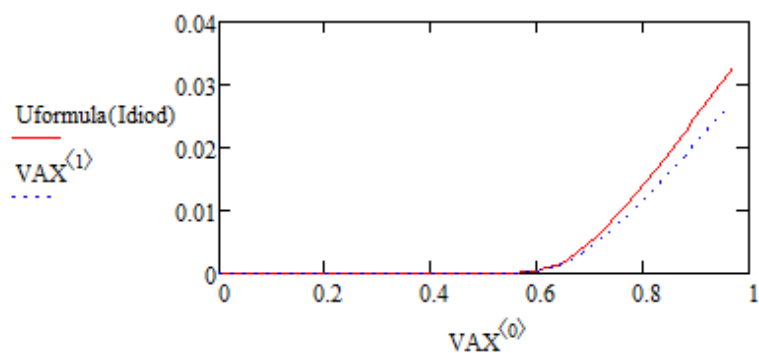
$$Idiod := VAX^{(1)}$$

$$Uformula(Idiod) := Idiod \cdot Rb1 + NFt1 \cdot \left( \frac{\ln(Idiod + Is01)}{Is01} \right)$$

$$(VAX^{(0)})_{45} = 0.879$$

$$Iproverka := (VAX^{(1)})_{45} \quad (VAX^{(1)})_{45} = 0.019$$

$$Uformula(Iproverka) = 0.023$$



Idiod =

	0
0	0
1	$9 \cdot 10^{-10}$
2	$2.3 \cdot 10^{-9}$
3	$4.2 \cdot 10^{-9}$
4	$7 \cdot 10^{-9}$
5	$1.1 \cdot 10^{-8}$
6	$1.68 \cdot 10^{-8}$
7	$2.51 \cdot 10^{-8}$
8	$3.7 \cdot 10^{-8}$
9	$5.41 \cdot 10^{-8}$
10	$7.88 \cdot 10^{-8}$
11	$1.143 \cdot 10^{-7}$
12	$1.652 \cdot 10^{-7}$
13	$2.383 \cdot 10^{-7}$
14	$3.433 \cdot 10^{-7}$
15	...

Рис. 12. Графики, построенные по экспериментальным и расчетным данным

## Часть 2

### Получение цепи для вычисления емкости диода в программе Microcap

Диод, когда он находится в состоянии обратного смещения, ведет себя как переменная емкость, которая изменяется в зависимости от напряжения, применяемого к его концам. Для определения этой емкости можно использовать косвенный метод, измеряя резонансную частоту вместе с подключенным диодом в известном контуре. Для проведения измерения резонансной частоты можно создать следующую схему

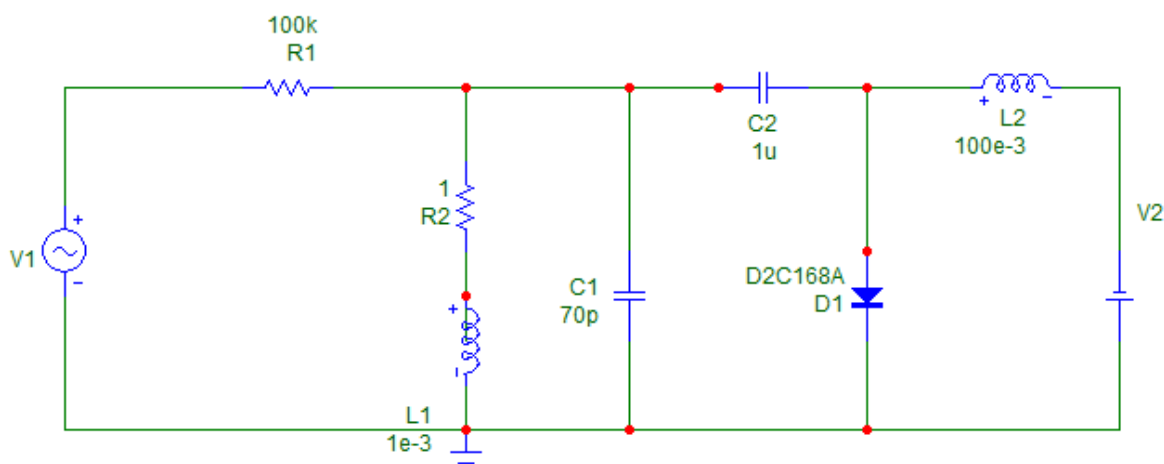


Рис. 13. Цепь для вычисления емкости диода

Резонансная частота параллельного колебательного контура предварительно может быть подсчитана по формуле Томпсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 1/f_{\text{рез.}}$$

Предварительно оцениваем частоту контура встроенным калькулятором:

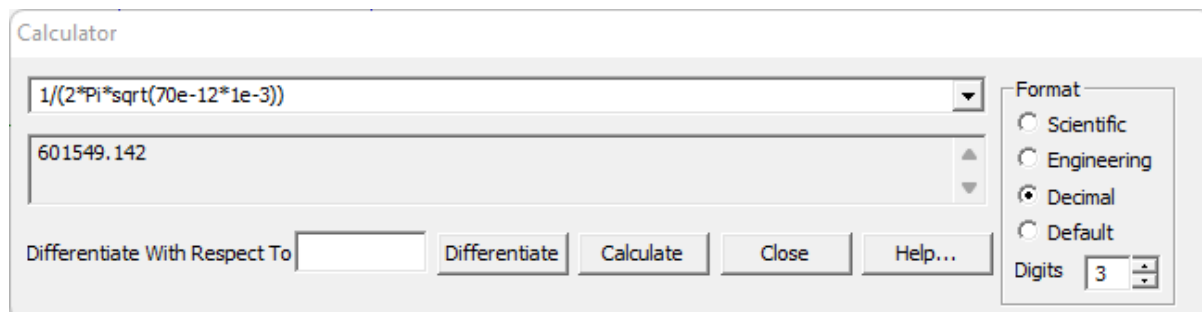


Рис. 14. Оценка частоты контура встроенным калькулятором.

Далее мы добавляем диод D2C168A параллельно к нашей существующей схеме, а затем, используя экспериментальный метод, определяем

резонансную частоту нового контура при различных значениях напряжения (V). Для этой цели мы можем воспользоваться анализом переменного тока (AC analysis), устанавливая диапазон частот от 200 кГц до 600 кГц. Этот диапазон выбран на основе формулы Томпсона, которая предсказывает, что частота колебаний контура без диода равна 600 кГц, и добавление диода уменьшит эту частоту.

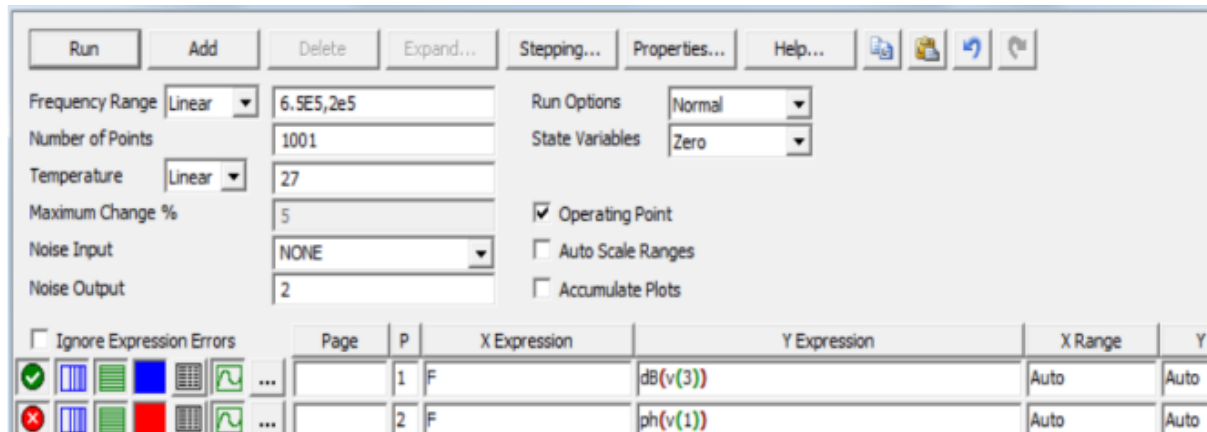


Рис. 15. Настройка пределов анализа по переменному току (AC).

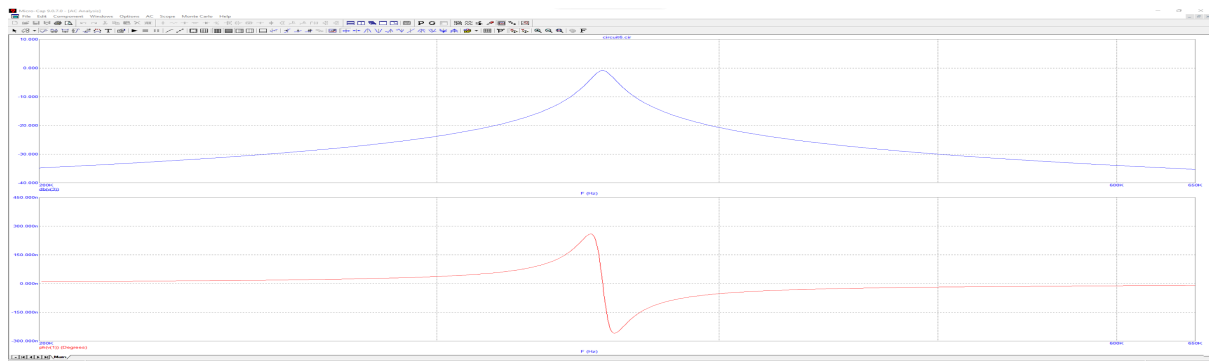


Рис. 16. Вид резонансной кривой.

Задавая значение напряжения источника управления V2, можно зафиксировать зависимость резонансной частоты от значения напряжения V2. Включаем многовариантный режим анализа, используя возможности режима Stepping, запустив данный анализ для значений напряжения 1,2...10 вольт

В результате решения будут получены несколько резонансных кривых, соответствующих указанным значениям напряжения управления

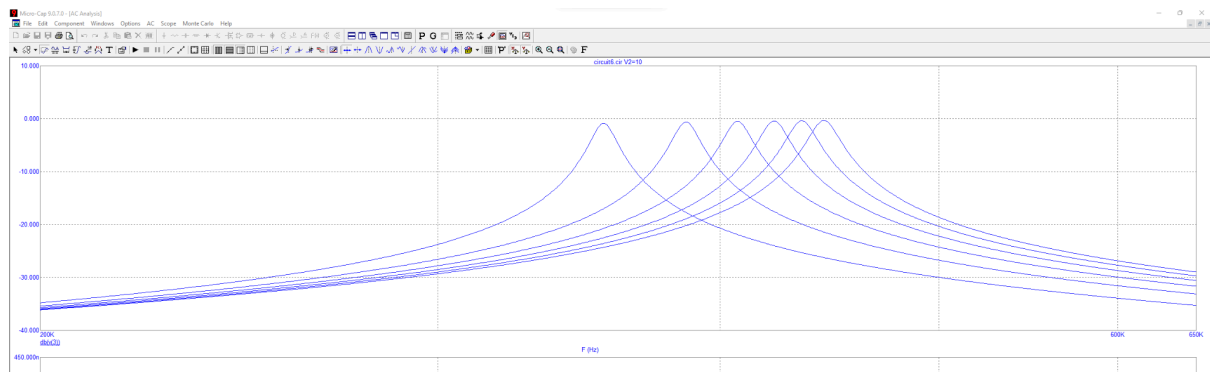


Рис. 17. Резонансные кривые в зависимости от смещения на диоде.

Исходя из графиков, мы можем выявить резонансные частоты, то есть точки максимума, при различных уровнях напряжения. Записываем эти резонансные частоты в файл вместе с соответствующими значениями напряжения в форме таблицы. Важно отметить, что значения напряжения будут отрицательными, так как диод подключен в обратном направлении.

После импорта снятых показаний из программы Microcap в программу Mathcad и записи их в матрицу DATA, в столбце Vvar содержатся значения напряжения, а в столбце Fmax - резонансные частоты

Vvar :=		Fmax :=	
	0		0
0	-1	0	$3.553 \cdot 10^5$
1	-2	1	$3.862 \cdot 10^5$
2	-3	2	$4.071 \cdot 10^5$
3	-4	3	$4.224 \cdot 10^5$
4	-5	4	$4.346 \cdot 10^5$
5	-6	5	$4.45 \cdot 10^5$
6	-7	6	$4.541 \cdot 10^5$
7	-8	7	$4.601 \cdot 10^5$
8	-9	8	$4.622 \cdot 10^5$
9	-10	9	$4.634 \cdot 10^5$

Рис. 18. Таблицы данных.

Построим график зависимости резонансной частоты от напряжения:

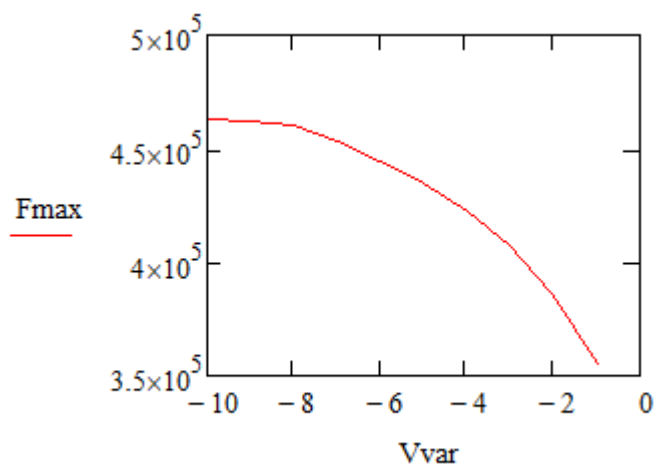


Рис. 19. График зависимости резонансной частоты от напряжения.

Емкость диода (Cd) может быть рассчитана следующим образом

$$C_k \cdot L_k - \frac{1}{4 \cdot F_r^2 \cdot \pi^2}$$

$$\frac{\quad}{L_k}$$

Перенесем из программы Мисгосар известные значения, относящиеся к характеристикам контура:

$$C_k := 10 \cdot 10^{-12} \quad L_k := 10^{-3} \quad \pi := 3.14$$

$$C_d := \frac{\left( C_k \cdot L_k - \frac{1}{4 \cdot F_{\max}^2 \cdot \pi^2} \right)}{L_k}$$

	0
0	1.909·10 <sup>-10</sup>
1	1.6·10 <sup>-10</sup>
2	1.43·10 <sup>-10</sup>
3	1.321·10 <sup>-10</sup>
4	1.242·10 <sup>-10</sup>
5	1.181·10 <sup>-10</sup>
6	1.13·10 <sup>-10</sup>
7	1.098·10 <sup>-10</sup>
8	1.087·10 <sup>-10</sup>
9	1.081·10 <sup>-10</sup>

Рис. 20. Таблица емкостей диода.



Получим график зависимости емкости диода от напряжения:

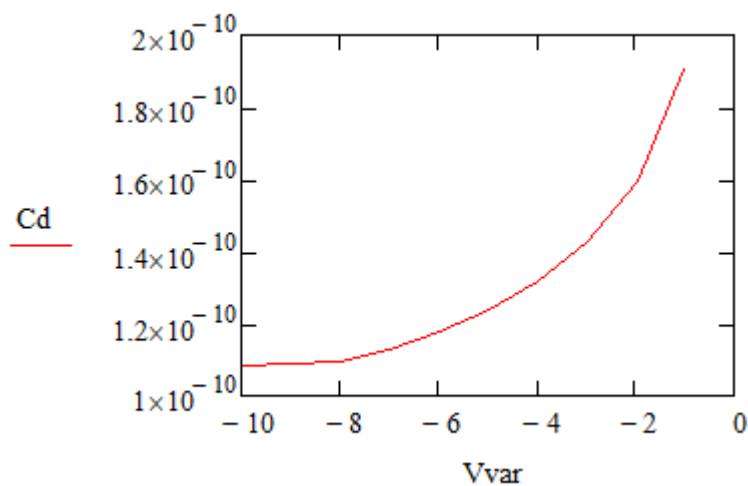
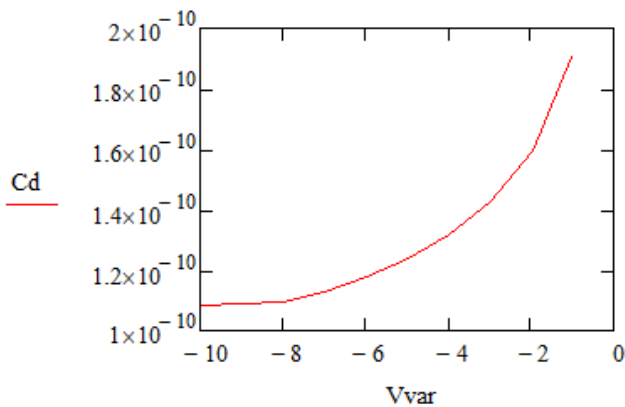


Рис. 21. График зависимости емкости диода от напряжения.

Вычислим характеристики диода: барьерную емкость и контактную разность потенциалов, используя следующую формулу:

$$C_d(U) := C_{J0} \cdot \left(1 - \frac{U}{V_{J0}}\right)^{-M}$$

Для расчета параметров барьерной емкости по указанной формуле, мы можем применить метод решения системы нелинейных уравнений с использованием вычислительного блока Given-Minerr. Для этого мы задаем систему из трех уравнений и начальное приближение:



$$M := 0.5 \quad VJ0 := 0.6 \quad CJO := 10^{-12}$$

Given

$$(Cd_0) = CJO \cdot \left(1 - \frac{Vvar_0}{VJ0}\right)^{-M}$$

$$(Cd_1) = CJO \cdot \left(1 - \frac{Vvar_1}{VJ0}\right)^{-M}$$

$$(Cd_2) = CJO \cdot \left(1 - \frac{Vvar_2}{VJ0}\right)^{-M}$$

$$Minerr(CJO, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 2.985 \times 10^{-10} \\ 0.315 \\ 0.313 \end{pmatrix}$$

Рис. 22. Значение параметров диода.

Сравним со значениями одноименных параметров, указанных в архиве отечественных полупроводниковых приборов:

model D2C168A D(Is=31.47f Rs=9.494 Ikf=0 N=1 Xti=3 Eg=1.11 **Cjo=220p**  
**M=.5959 Vj=.75** Fc=.5 Isr=2.035n Nr=2 Bv=6.848 Ibv=95.79m Nbv=28  
 Ibvl=3m Nbv1=120 Tbv1=600u)

Cj0: Полученные данные немного больше истинных данных, но разница не кажется критической

Vj: Полученные данные немного ниже истинных

M: Полученные данные немного ниже истинных

В целом, различия между полученными данными и характеристиками модели не кажутся критически важными, но они могут повлиять на работу диода

## **Вывод**

Были проведены натурные и модельные испытания в программах схемотехнического анализа MathCad 15 и Micro-Cap 9. В результате были получены исходные данные, необходимые для расчета параметров модели полупроводникового диода.

Также я приобрела навыки построения электрических цепей для измерения емкости диода или любой другой емкости с использованием резонансного метода. Кроме того, я освоила расчет барьерной емкости диода, используя статистические данные о его применении