



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

Факультет «Информатика и системы управления»  
Кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

**ОТЧЁТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1**  
**«ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ**  
**ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА В**  
**ПРОГРАММЕ MICROCAP»** по курсу  
«Основы электроники»

Студент: Беляк Софья Сергеевна

Группа: ИУ7-32Б

Вариант: 52

Студент  
дата

\_\_\_\_\_ Беляк С.С. *подпись,*

Преподаватель  
*подпись, дата*

\_\_\_\_\_ Оглоблин Д. И.

Оценка \_\_\_\_\_

2023 г

## Оглавление

Параметры диода.....	4
Получение ВАХ в программе Microcap .....	4
Расчет параметров диода в программе Mathcad .....	9
Вывод .....	13

**Цель работы** - проведение экспериментальных исследований (натурных и модельных в программах схемотехнического анализа MathCad 15 и Micro-Cap 12) полупроводникового диода с целью получения исходных данных для расчёта параметров модели полупроводникового диода и внесение модели в базу данных программ схемотехнического анализа.

## Параметры диода

В данной работе применяется пятьдесят второй тип диода KD208A

Характеристики диода представлены ниже в текстовом виде, взятые из вкладки "Text" программы Microcap.

```
.Model KD208A D(Is=181p N=1.31 Rs=0.12 Cjo=96.3p Tt=2.23e-7  
+ M=0.38 Vj=0.68 Fc=0.5 Bv=100 IBv=1e-10 Eg=1.11 Xti=3)
```

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).

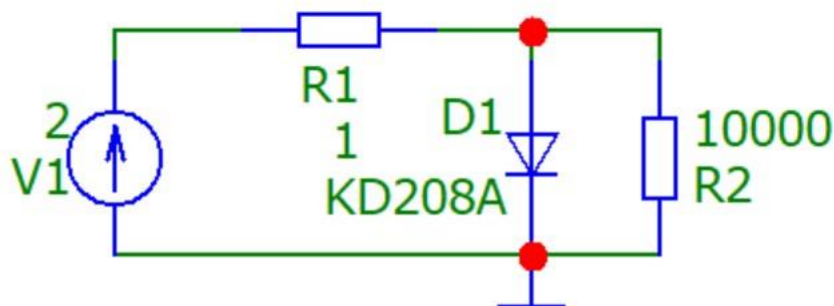


Рис. 2. Схема для снятия ВАХ с прямой ветви

Идеальный амперметр должен иметь низкое сопротивление, так как он подключается последовательно в цепь (показано на схеме как R1). С другой стороны, идеальный вольтметр должен иметь высокое сопротивление, так как он подключается параллельно к цепи (показано на схеме как R2). Такое сочетание сопротивлений минимизирует искажения, вносимые этими приборами.

Когда диод подключен прямо, его сопротивление незначительно, и параллельно подключенный вольтметр не создаст проблем.

В процессе установки схемы заменяем диод на свой вариант:

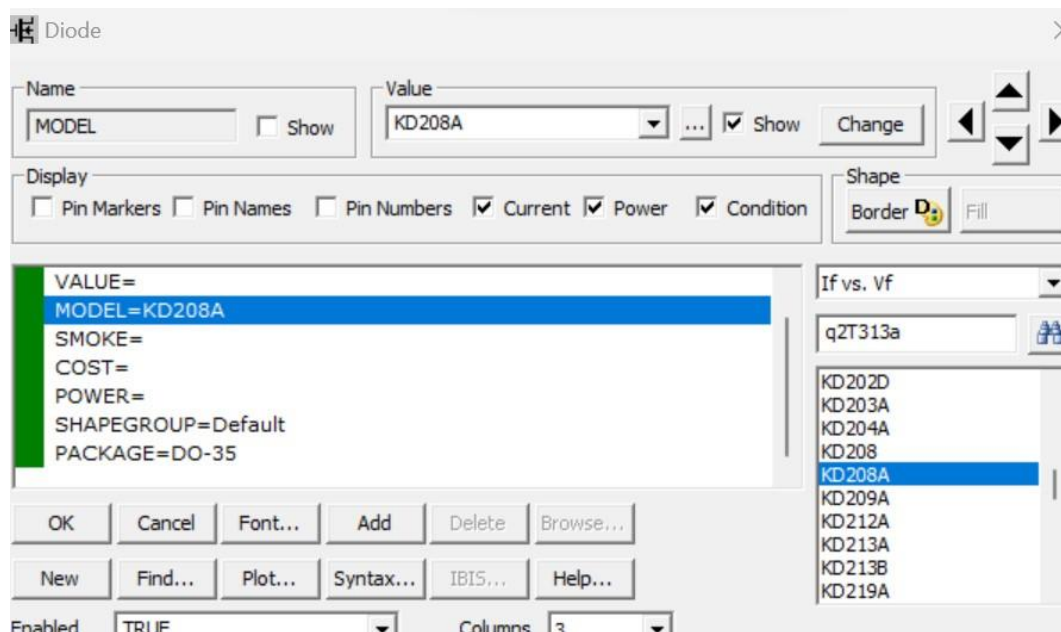


Рис. 3. Замена диода на свой вариант

Для снятия показаний и построения графика зависимости прямого тока от напряжения на диоде используем пункт DC Analysis, в появившемся окне устанавливаем нужную формулу:

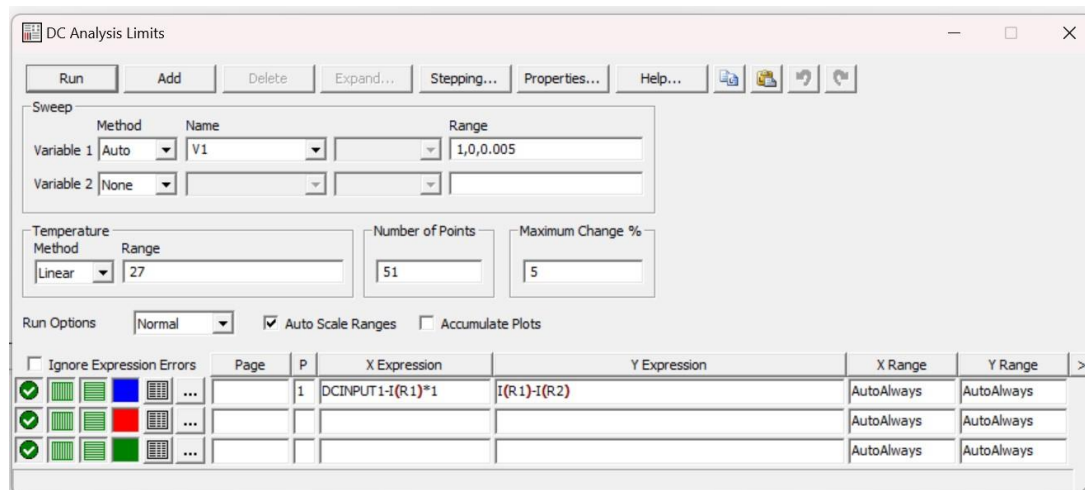


Рис. 4. Ввод формулы для прямой ветви

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:

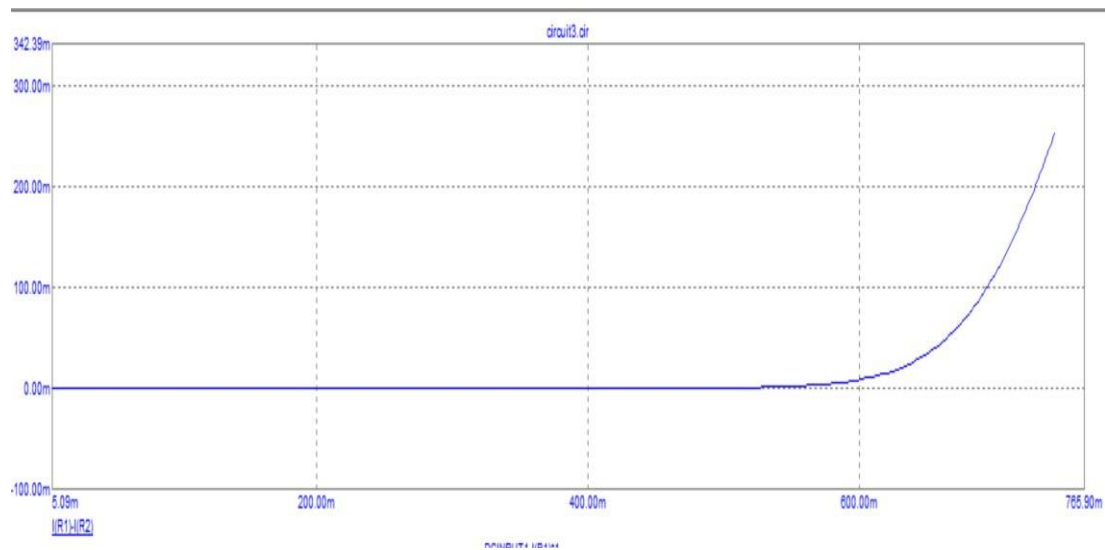


Рис. 5. Зависимость прямого тока от напряжения на диоде

Для отображения только измерений прямого тока требуется использовать данные из таблицы значений. В выводимом файле будет включена вся необходимая информация о задаче, версии программы и прочем, а сама таблица значений будет расположена в конце файла.

```

Micro-Cap 12.2.0.5 (32 bit) - [C:\MC12\data\circuit3.DNO]
File Edit Component Windows Options DC Scope Monte Carlo Help
[Icons]
*****
***                               Micro-Cap 12.2.0.5 (32 bit)                               ***
***                                                                                               ***
***                                                                                               ***
***                               DC Analysis of circuit3                                         ***
***                               17.09.2023 17:19:34                                           ***
***                                                                                               ***
Limits
=====
Variable 1 Method      Auto
Variable 1 Name        V1
Variable 1 Range       1,0,0.005
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                               ***

```

Рис. 6. Файл с необходимой информацией.

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.

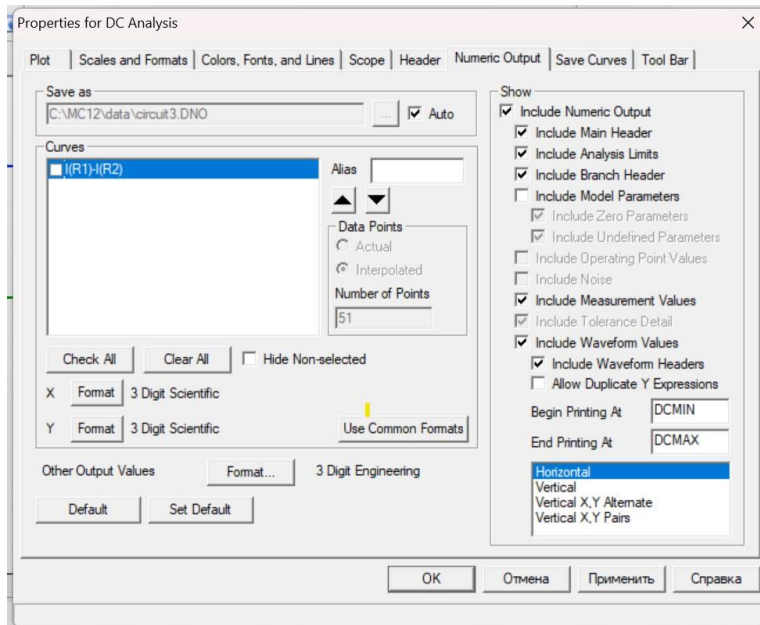


Рис. 7. Настройки файловой информации до исправлений

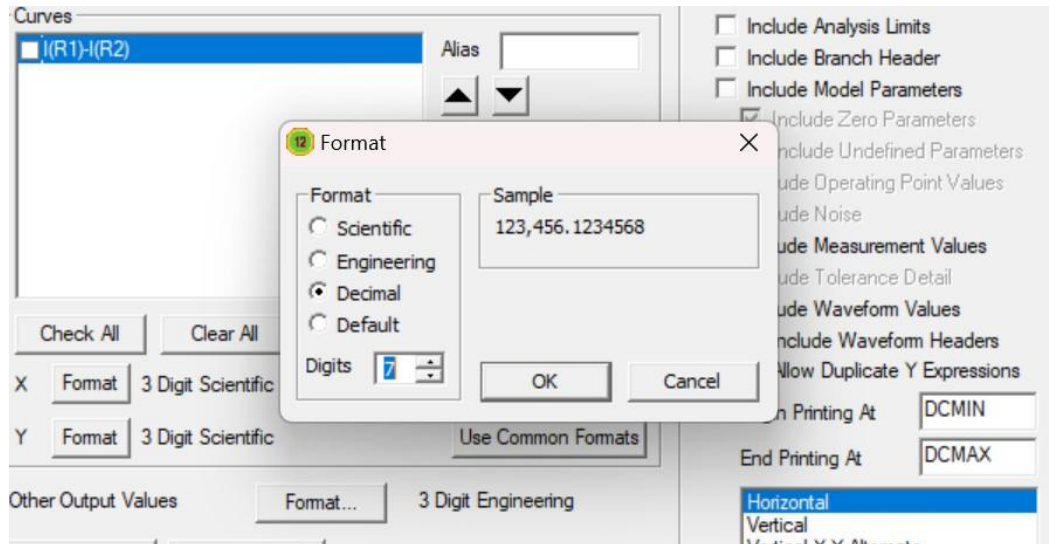


Рис. 8. Исправление формата видимых данных

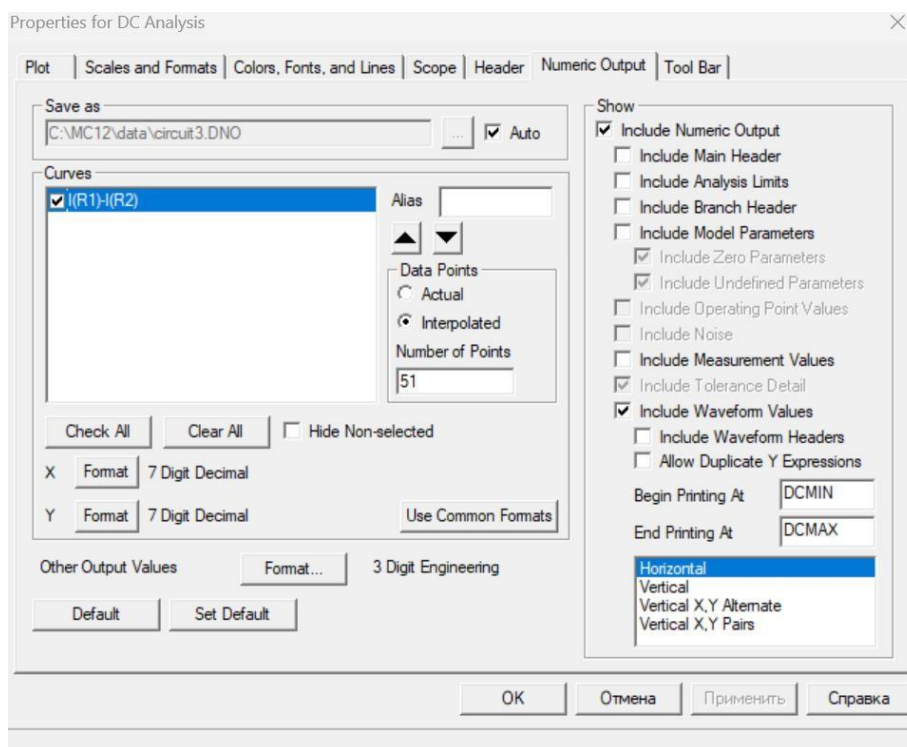


Рис. 9. Настройки файловой информации после исправлений

После выполнения всех настроек (рис 9.) 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.

000000000000000	
0.0000000	-0.0000000
0.0199980	0.0000000
0.0399960	0.0000000
0.0599940	0.0000000
0.0799920	0.0000000
0.0999900	0.0000000
0.1199880	0.0000000
0.1399860	0.0000000
0.1599840	0.0000000
0.1799820	0.0000000
0.1999799	0.0000001
0.2199779	0.0000001
0.2399758	0.0000002
0.2599736	0.0000004
0.2799713	0.0000007
0.2999687	0.0000013
0.3199657	0.0000023
0.3399619	0.0000041
0.3599565	0.0000075
0.3799486	0.0000134
0.3999357	0.0000243
0.4199143	0.0000437
0.4398772	0.0000788
0.4598121	0.0001420
0.4796968	0.0002552

Рис. 10. Исправленный файл с информацией для таблиц



## Расчет параметров диода в программе Mathcad

После импорта снятых показаний из программы Microsar в программу Mathcad и записи их в матрицу VAX (см. рис. 11), строим график на основе этой матрицы. Это позволит нам удобно работать с данными и их анализировать. Построим график, используя матрицу VAX, чтобы визуальнo 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 := READPRN("C:\MC12\data\circuit3.DNO")

VAX =

	0	1
0	0	0
1	0.02	0
2	0.04	0
3	0.06	0
4	0.08	0
5	0.1	0
6	0.12	0
7	0.14	0
8	0.16	0
9	0.18	0
10	0.2	$1 \cdot 10^{-7}$
11	0.22	$1 \cdot 10^{-7}$
12	0.24	$2 \cdot 10^{-7}$
13	0.26	$4 \cdot 10^{-7}$
14	0.28	$7 \cdot 10^{-7}$
15	0.3	...

VAX<sup>(0)</sup> =

	0
0	0
1	0.02
2	0.04
3	0.06
4	0.08
5	0.1
6	0.12
7	0.14
8	0.16
9	0.18
10	0.2
11	0.22
12	0.24
13	0.26
14	0.28
15	...

VAX<sup>(1)</sup> =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	$1 \cdot 10^{-7}$
11	$1 \cdot 10^{-7}$
12	$2 \cdot 10^{-7}$
13	$4 \cdot 10^{-7}$
14	$7 \cdot 10^{-7}$
15	...

Рис. 11. Матрица VAX

По оси X (напряжение) – VAX 0,  
по оси Y (ток) – VAX 1.

Получаем график VAX в Mathcad.

Рис 12. Столбцы матрицы VAX,

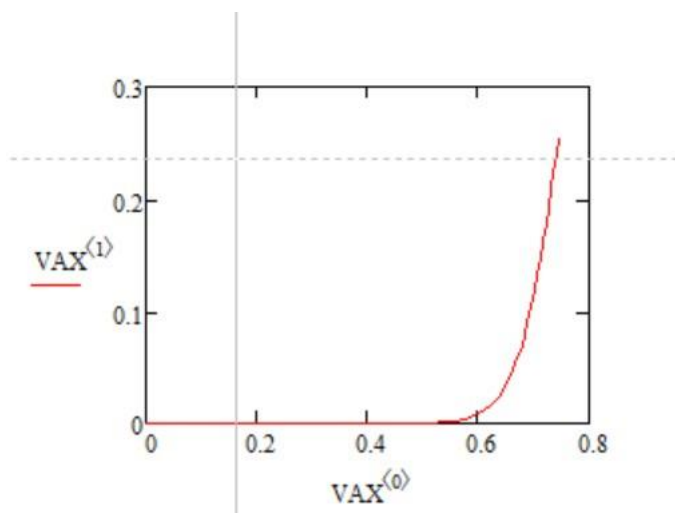


Рис. 13. график VAX в Mathcad.

## 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.

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

Простейшая модель диода с учётом объёмного сопротивления области базы описывается уравнением тока диода: где  $I_o$  – обратный ток перехода,  $R_b$  – объемной сопротивление базы,  $N \cdot F_t$  –тепловой потенциал.

Для определения трёх неизвестных  $R_b$ ,  $N \cdot F_t$  и  $I_o$  следует взять три экспериментальных отсчёта (точки) статической характеристики, получить и

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

решить систему из трёх нелинейных уравнений.

$U_{d1} := 0.64762$	$U_{d2} := 0.68949$	$U_{d3} := 0.7227$	$U_{d4} := 0.74039$
$I_{d1} := 0.032311$	$I_{d2} := 0.090442$	$I_{d3} := 0.17723$	$I_{d4} := 0.23954$
$R_b := \frac{(U_{d1} - 2 \cdot U_{d2} + U_{d3})}{I_{d1}}$		$R_b = -0.268$	
$N F_t := \frac{(3 \cdot U_{d2} - 2 \cdot U_{d1} - U_{d3})}{\ln(2)}$		$N F_t = 0.073$	
$I_s := I_{d1} \cdot \exp\left[\frac{(U_{d2} - 2 U_{d1})}{N F_t}\right]$		$I_s = 7.955 \times 10^{-6}$	

Рис. 14. 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 (см. рисунок 15).

$$\begin{aligned}
 & \text{RbE} := 0.04 \quad \text{Is0} := 0.0000001 \quad \text{mE} := 2 \quad \text{Ft} := 0.0255 \\
 & \text{Given} \\
 & \text{Ud1} = \text{Id1} \cdot \text{RbE} + \ln \left[ \frac{(\text{Is0} + \text{Id1})}{\text{Is0}} \right] \cdot \text{mE} \cdot \text{Ft} \\
 & \text{Ud2} = \text{Id2} \cdot \text{RbE} + \ln \left[ \frac{(\text{Is0} + \text{Id2})}{\text{Is0}} \right] \cdot \text{mE} \cdot \text{Ft} \\
 & \text{Ud3} = \text{Id3} \cdot \text{RbE} + \ln \left[ \frac{(\text{Is0} + \text{Id3})}{\text{Is0}} \right] \cdot \text{mE} \cdot \text{Ft} \\
 & \text{Ud4} = \text{Id4} \cdot \text{RbE} + \ln \left[ \frac{(\text{Is0} + \text{Id4})}{\text{Is0}} \right] \cdot \text{mE} \cdot \text{Ft} \\
 & \text{Diod\_P} := \text{Minerr}(\text{Is0}, \text{RbE}, \text{mE}, \text{Ft}) \\
 & \text{Diod\_P} = \begin{pmatrix} 1.834 \times 10^{-10} \\ 0.12 \\ 1.63 \\ 0.021 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 15. 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.

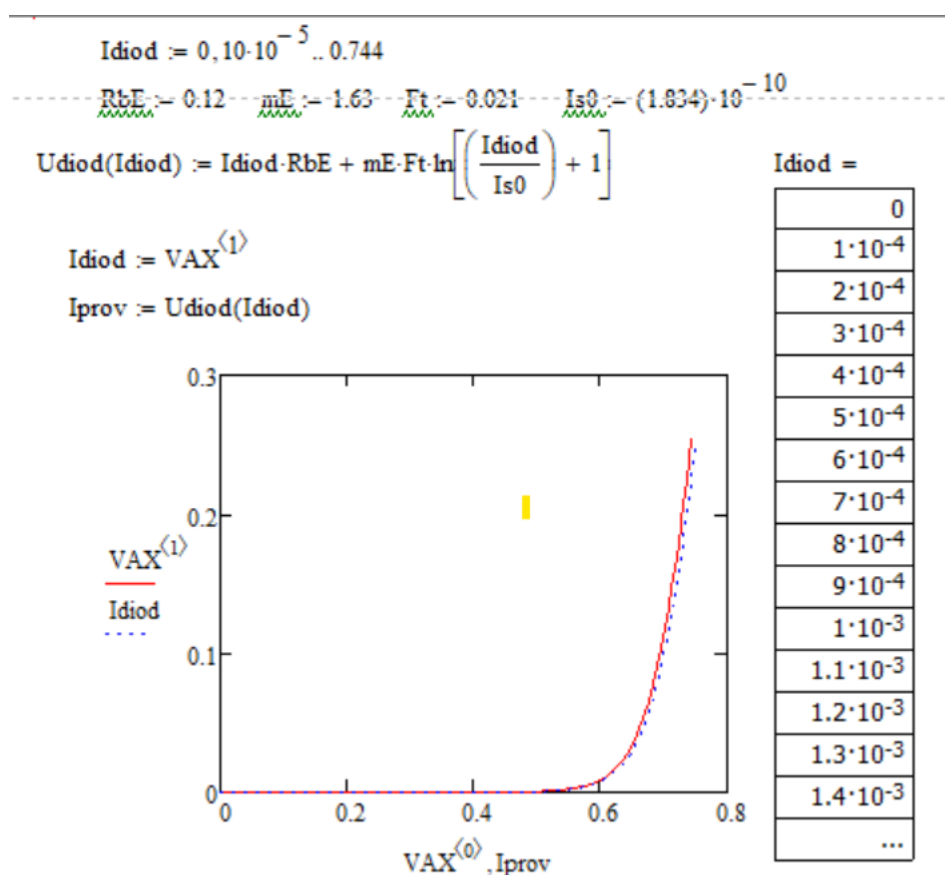


Рис. 17. Графики, построенные по экспериментальным и расчетным данным

## **Вывод**

Цель проведения экспериментальных исследований полупроводникового диода была достигнута. Были проведены натурные и модельные испытания в программах схемотехнического анализа MathCad 15 и Micro-Cap 12. В результате были получены исходные данные, необходимые для расчета параметров модели полупроводникового диода.