

МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Работу выполнил:  
студент группы ИУ7-32Б  
Тузов Даниил

Работу проверил:  
Дмитрий Игоревич Оглоблин

Москва, 2023 г.

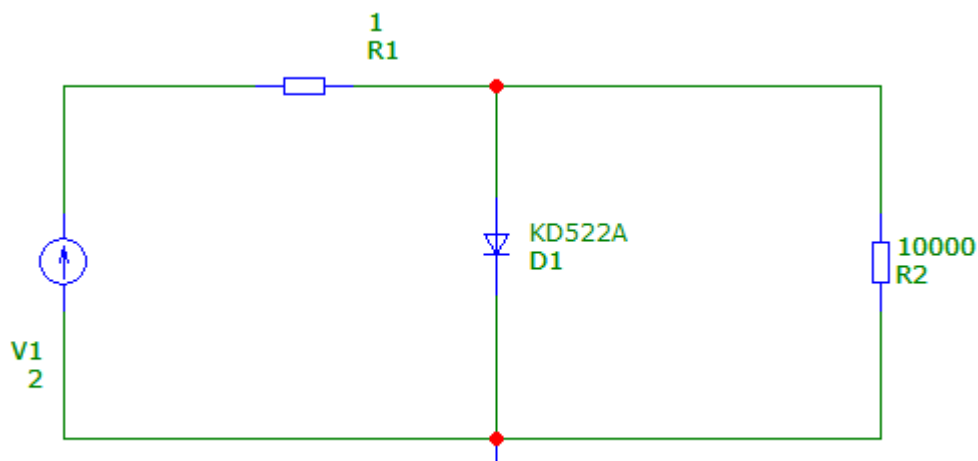
## **ЦЕЛЬ ПРАКТИКУМА:**

Получение в программе схемотехнического анализа Microcap XX 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

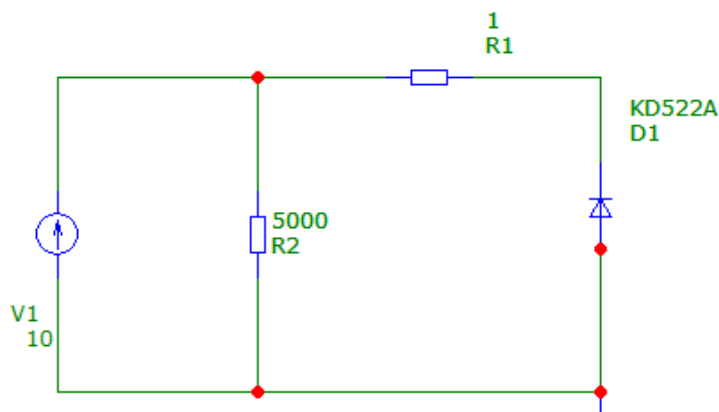
# Часть 1

## *Пункт 1-2. Работа в MicroCap11*

В рамках этого эксперимента была собрана экспериментальная ветвь с прямым током



И обратным током:

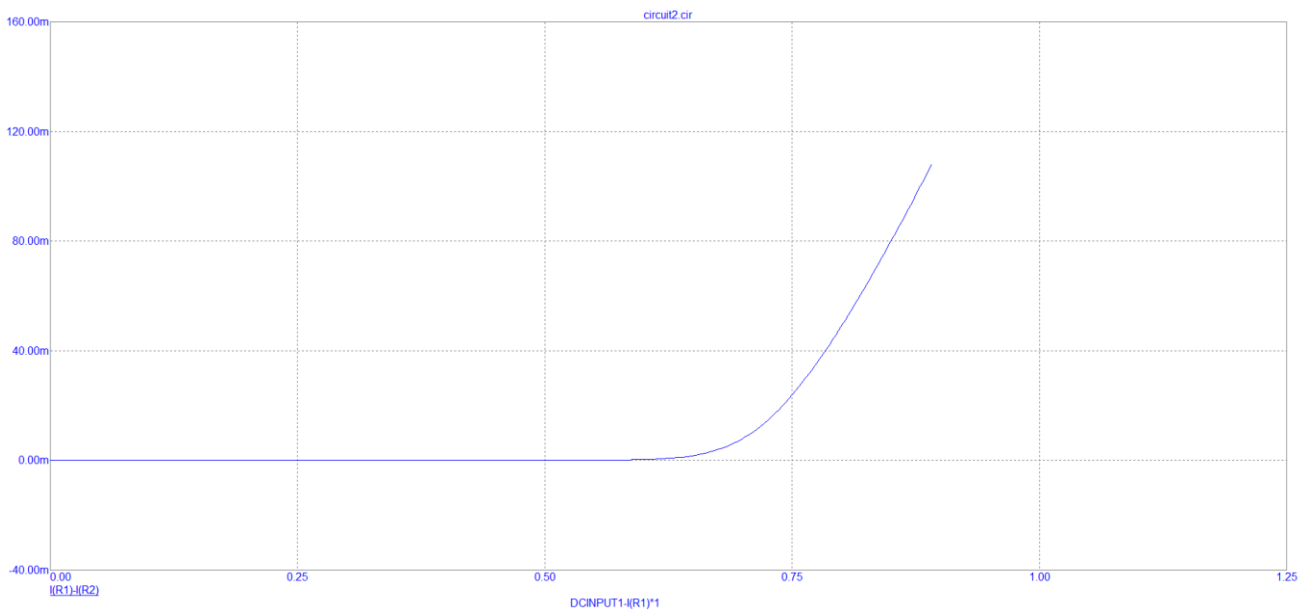


Данный выбор схем объясняется следующими соображениями. Несмотря на то, что идеальных измерительных приборов не существует, все-таки амперметр должен обладать относительно малым сопротивлением, а вольтметр, наоборот, довольно значительным. При прямом включении диод имеет малое сопротивление, и, если 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

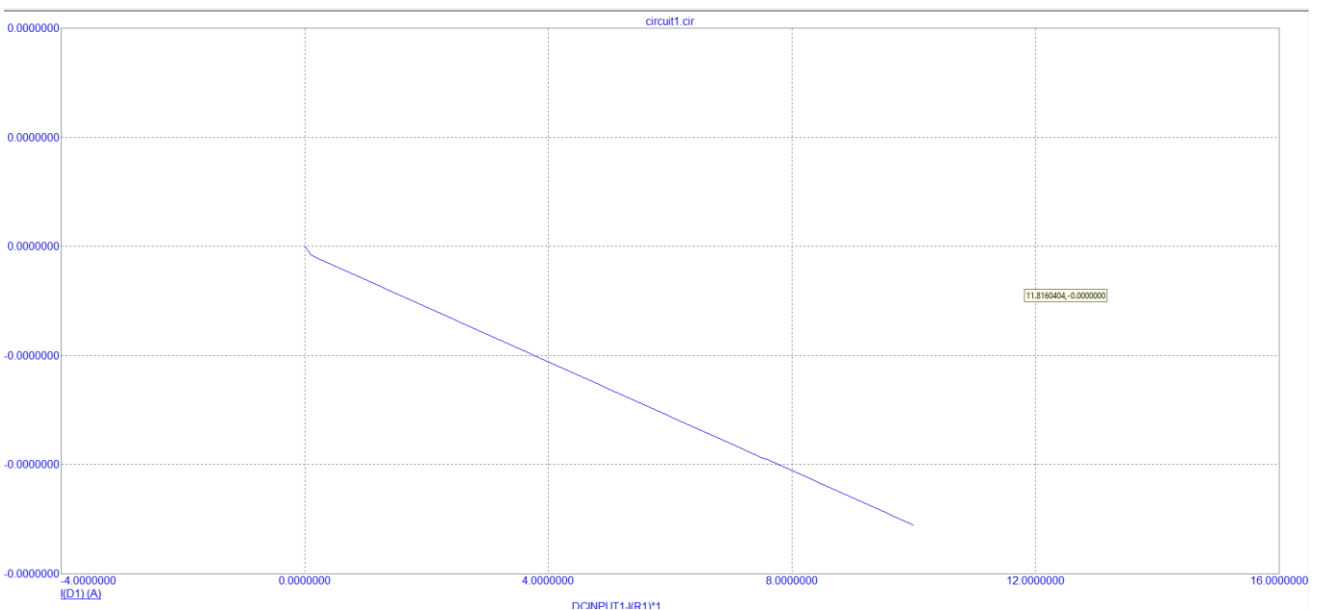
станут соизмеримы, и потери в токе окажутся весомыми. Поэтому следует точно измерить ток на ветви диода, вставив в нее амперметр, потерями напряжения можно пренебречь, т.к. падение напряжения на диоде при обратном включении будет гораздо больше потерь на амперметре. Проиллюстрируем сказанное графиками, построенным в MicroCap 11 по схеме, приведенной выше.

Для диода модели KD522A, соответствующей моему варианту, были получены ВАХ в программе MicroCap:

Для прямого тока:



Для обратного тока:



Для анализа нашей ВАХ и нахождения физических параметров диода воспользуемся программой MathCAD. Чтобы вычислительный блок

Given...Minerr сработал как можно точнее, возьмем 7 точек в наиболее нелинейной части BAX

Для того, чтобы использовать полученные данные в программе MathCAD необходимо привести данные к соответствующему формату

Вариант «До»:

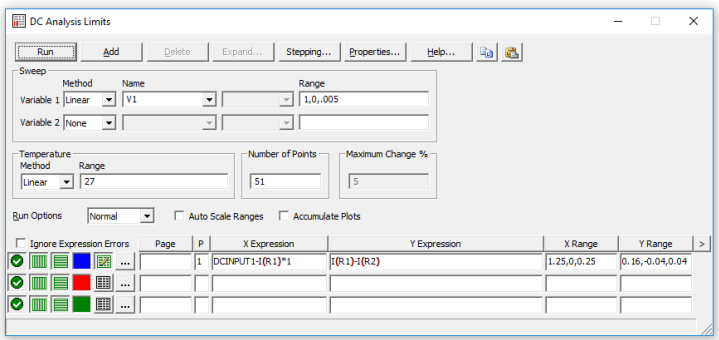
```
.....
***                               ***
***      Micro-Cap 11.2.0.3 (32 bit)      ***
***                               ***
***      DC Analysis of circuit2      ***
***      24.09.2023 14:35:04      ***
***                               ***
.....
Limits
=====
Variable 1 Method      Linear
Variable 1 Name        V1
Variable 1 Range       1,0,.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      Off
Accumulate Plots       Off
Ignore Expression Errors Off

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

Temperature=27

Waveform Values
=====
DCINPUT1-I (R1)*1 I (R1) -I (R2)

5.899E-31 -5.899E-31
2.000E-02 2.514E-13
4.000E-02 7.389E-13
5.999E-02 1.703E-12
7.999E-02 3.630E-12
9.999E-02 7.500E-12
1.200E-01 1.530E-11
1.400E-01 3.102E-11
1.600E-01 6.276E-11
1.800E-01 1.268E-10
2.000E-01 2.562E-10
2.200E-01 5.176E-10
2.400E-01 1.045E-09
2.600E-01 2.111E-09
2.800E-01 4.263E-09
3.000E-01 8.611E-09
```



Вариант «После»:

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
0.1999800	0.0000000
0.2199780	0.0000000
0.2399760	0.0000000
0.2599740	0.0000000
0.2799720	0.0000000
0.2999700	0.0000000
0.3199680	0.0000000
0.3399660	0.0000000
0.3599639	0.0000001
0.3799619	0.0000001
0.3999597	0.0000003
0.4199574	0.0000006
0.4399548	0.0000012
0.4599516	0.0000024
0.4799472	0.0000048
0.4999403	0.0000097
0.5199284	0.0000196
0.5399065	0.0000395
0.5598644	0.0000796
0.5797823	0.0001598
0.5996213	0.0003188
0.6193093	0.0006287
0.6387218	0.0012143
0.6576704	0.0022638
0.6759286	0.0040038
0.6933084	0.0066223
0.7097400	0.0101890
0.7252807	0.0146468
0.7400596	0.0198664
0.7542201	0.0257045
0.7678890	0.0320342
0.7811682	0.0387537
0.7941366	0.0457840
0.8068543	0.0530650
0.8193672	0.0605508
0.8317108	0.0682060
0.8439127	0.0760029
0.8559946	0.0839198
0.8679739	0.0919393
0.8798648	0.1000473
0.8916785	0.1082323

# Пункт 3-4. Работа в MathCAD

Найдем параметры диода в программе MathCAD

Для начала выгрузим значения из файла, сформированного в результате предыдущих пунктов

Матрица

$\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$   $\times_n$   $\times^{-1}$   $| \times |$   $\overrightarrow{f(m)}$   $m^{<y>}$   $m^T$   $m..n$   $\hat{a} \cdot \hat{b}$   $\hat{a} \times \hat{b}$   $\sum U$   $\frac{dy}{dx}$

Вычисление

$=$   $:=$   $\equiv$   $\rightarrow$   $\mapsto$   $f_x$   $x_f$   $x_f y$   $x_f y$

Булева алгебра

$=$   $<$   $>$   $\leq$   $\geq$   $\neq$   $\neg$   $\wedge$   $\vee$   $\oplus$

VAX := READPRN("D:\MC11\DATA\circuit1.DNO")

$VAX^{<0>}$

	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	...

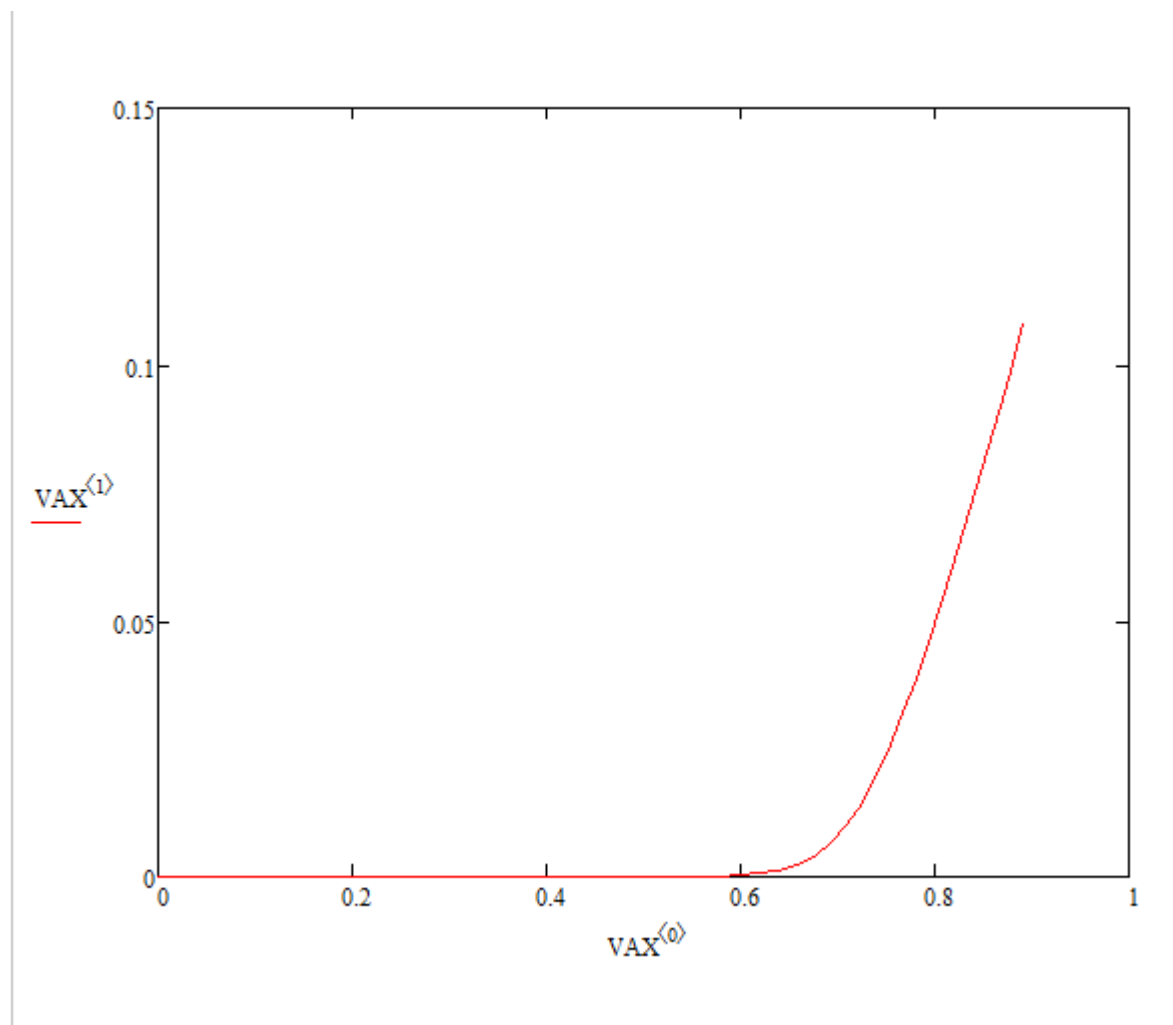
$\sum(VAX^{<0>}) = 24.653$

$VAX^{<1>}$

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

$\sum(VAX^{<1>}) = 0.844$

И построим по ним график зависимости силы тока от напряжения





Для самопроверки найдем параметры полупроводникового диода методом трех ординат

$$\begin{aligned}
 Id3 &:= \max(VAX^{(1)}) & Id3 &= 0.108 \\
 nMax &:= \text{match}(Id3, VAX^{(1)}) \\
 nMax &= (50) \\
 Ud3 &:= (VAX^{(0)})_{50} & Ud3 &= 0.892 \\
 nId1 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{15}, VAX^{(1)}\right) & nId2 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{7}, VAX^{(1)}\right) \\
 nId1 &= (35) & nId2 &= (37) \\
 \hline
 Ud1 &:= \text{interp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{15}\right) & Ud1 &= 0.696 & Id1 &:= \frac{Id3}{15} & Id1 &= 7.215 \times 10^{-3} \\
 Ud2 &:= \text{interp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{7}\right) & Ud2 &= 0.728 & Id2 &:= \frac{Id3}{7} & Id2 &= 0.015 \\
 Rb &:= \frac{(Ud1 - 2 \cdot Ud2 + Ud3)}{Id1} & Rb &= 18.369 \\
 NFt &:= \frac{[(3 \cdot Ud2 - 2 \cdot Ud1) - Ud3]}{\ln(2)} & NFt &= -0.146 \\
 Io &:= Id1 \cdot \exp\left[\frac{-1}{NFt} \cdot (2 \cdot Ud1 - Ud3)\right] & Io &= 0.224
 \end{aligned}$$

И методом Given Minerr

$$Rb := 1 \quad Is0 := 0.0000001 \quad m := 2 \quad Ft := 0.02$$

Given

$$0.892 = 0.108 \cdot Rb + \ln\left[\frac{(Is0 + 0.108)}{Is0}\right] \cdot m \cdot Ft$$

$$0.88 = 0.1 \cdot Rb + \ln\left[\frac{(Is0 + 0.1)}{Is0}\right] \cdot m \cdot Ft$$

$$0.74 = 0.015 \cdot Rb + \ln\left[\frac{(Is0 + 0.015)}{Is0}\right] \cdot m \cdot Ft$$

$$0.71 = 0.01 \cdot Rb + \ln\left[\frac{(Is0 + 0.01)}{Is0}\right] \cdot m \cdot Ft$$

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

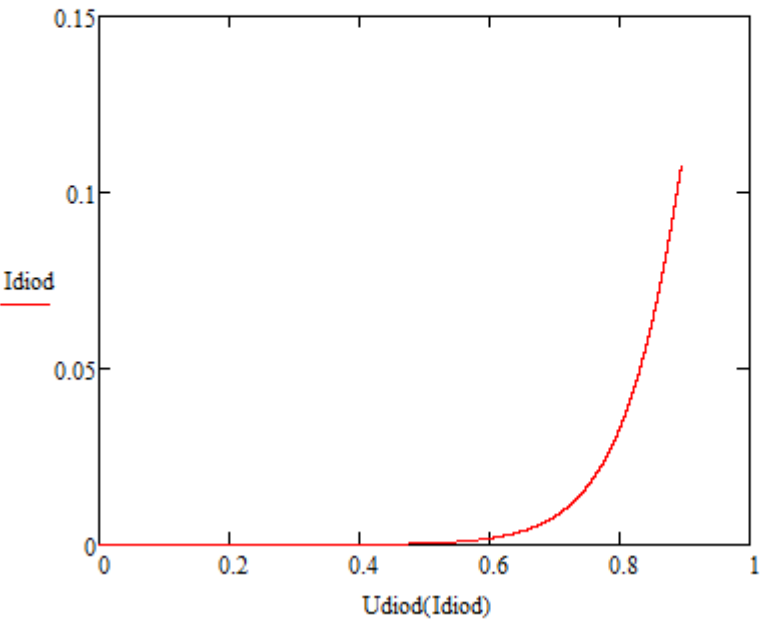
$$Diod\_P = \begin{pmatrix} 2.359 \times 10^{-7} \\ 0.208 \\ 2.575 \\ 0.026 \end{pmatrix}$$

Построим новый график теоретической зависимости силы тока и напряжения полупроводникового диода по полученным в результате метода Given Minerr значениям

$R_b := 0.208$      $I_{s0} := 2.359 \cdot 10^{-7}$      $F_t := 0.026$      $m := 2.575$

$I_{diod} := 0,0.00001..0.108$

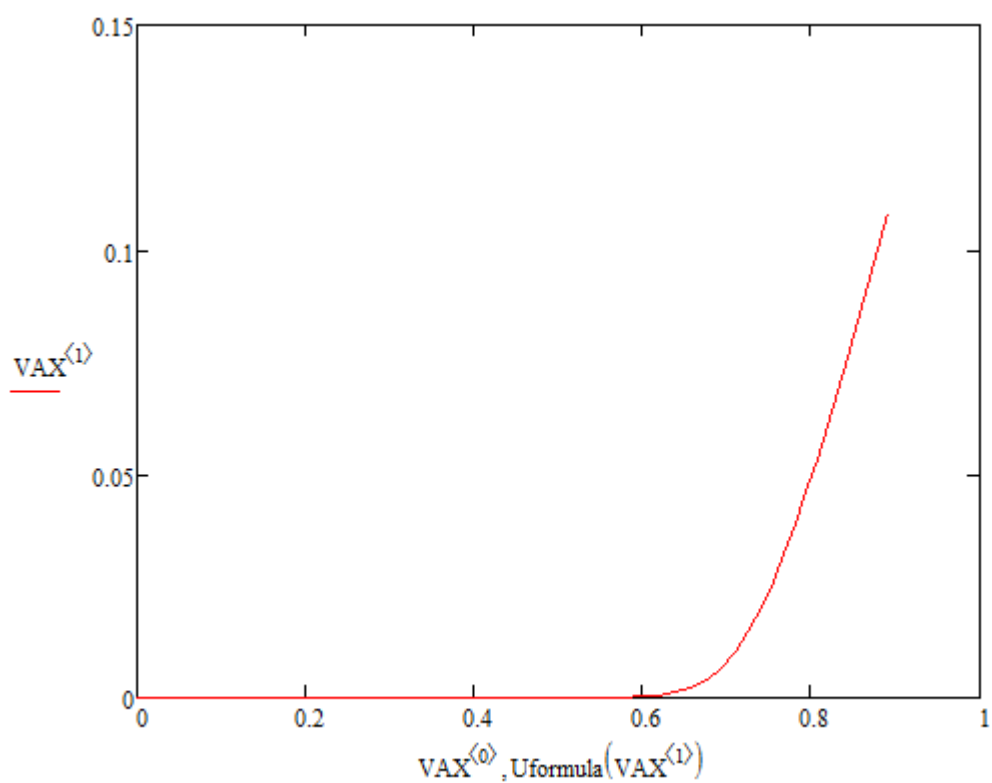
$U_{diod}(I_{diod}) := I_{diod} \cdot R_b + m \cdot F_t \cdot \ln\left(\frac{I_{diod} + I_{s0}}{I_{s0}}\right)$



$I_{diod} =$

0
$1 \cdot 10^{-5}$
$2 \cdot 10^{-5}$
$3 \cdot 10^{-5}$
$4 \cdot 10^{-5}$
$5 \cdot 10^{-5}$
$6 \cdot 10^{-5}$
$7 \cdot 10^{-5}$
$8 \cdot 10^{-5}$
$9 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^{-4}$
$1.1 \cdot 10^{-4}$
$1.2 \cdot 10^{-4}$
$1.3 \cdot 10^{-4}$
$1.4 \cdot 10^{-4}$
...

Сравним теоретическую и экспериментальную зависимость



Как можно заметить теоретический график и экспериментальный совпадают, что свидетельствует от правильности проведенных измерений.