



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 КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ (ИУ6)

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ 09.03.01 Информатика и вычислительная техника


**О Т Ч Е Т**

по домашнему заданию № 1

Название: Исследование характеристик и моделирование схем с  
полупроводниковыми диодами

Дисциплина: Электроника

Студент ИУ6-426  
(Группа)

 12.03.2021  
(Подпись, дата)

И.С. Марчук  
(И.О. Фамилия)

Преподаватель

В.А. Карпухин  
(И.О. Фамилия)

## Исследование характеристик и моделирование схем с полупроводниковыми диодами

Вариант:

Вариант №	Тип диода	$R_i$ , кОм	$R_H$ , кОм	$C_1$ , нФ
19	2Д250А	3,2	64	640

Таблица 1 – Условие задачи и вариант

1. Для заданного диода найти и обосновать параметры SPICE-модели. Результат оформить в виде таблицы с объяснением соответствия найденных параметров параметрам SPICE-модели.
2. Для заданного диода по найденным параметрам SPICE-модели построить в среде MathCAD и в среде Multisim вольтамперные характеристики для режимов прямого и обратного смещения. Сравнить полученные графики.  
Примечание: для измерения ВАХ в программе Multisim использовать следующую схему, измеряя ток и напряжение на диоде:

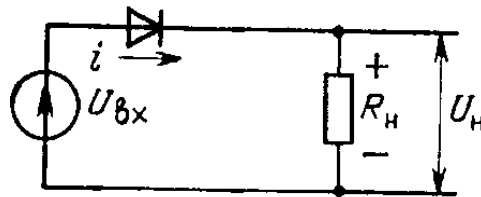


Рисунок 1 – Схема 1

3. Для схемы (см. рисунок п.2) найти и построить зависимости тока, напряжения на диоде и выходного напряжения от входного напряжения в диапазоне от 0 до 10 В:
  - а) графически методом наложения характеристик. Использовать лист миллиметровой бумаги размером А4. Шаг по напряжению 1 В.
  - б) в среде Multisim. Заданы: напряжение  $E$  и сопротивление  $R$  эквивалентного источника  $U_{вх}$ , сопротивление  $R_H$  нагрузки. Использовать нелинейную модель диода.Сравнить полученные результаты.

4. Для заданной схемы найти и построить зависимость выходного напряжения от времени при подаче на вход знакопеременного симметричного меандра с амплитудой 10 В и частотой 1 кГц на протяжении двух периодов меандра:

- 1) Аналитически любым методом (классическим, операторным, преобразования Лапласа, интеграла Дюамеля) в среде MathCAD.
- 2) В среде Multisim. Использовать кусочно-линейную модель ВАХ диода. Напряжение открывания диода считать равным 0,7 В. Сопротивлением открытого р-п перехода пренебречь.

Сравнить полученные результаты.

Найти и сравнить полученные средние значения выходного напряжения и размах пульсаций р-р.

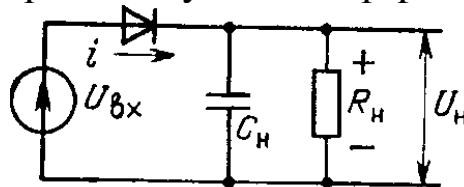


Рисунок 2 – Схема 2

# 1. Расчет SPICE модели для диода 2D250A:

Значения для расчетов взяты с сайта <http://chiplist.ru/diodes/2D250A/>

$\varphi_t \approx 0.025$  – температурный потенциал

$$I_{пр} = I_s * \left( e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} - 1 \right) =>$$

$$10 = I_s * \left( e^{\frac{1.4}{0.025*2}} - 1 \right) => I_s = 0,69144E-13$$

$$R_s = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} = \frac{1.4}{10} = 0.14$$

Характеристика	Значения	Единицы изм.
прямой ток $I_{пр}$	10	А
прямое напряжение $U_{пр}$	1.4	В
Ток насыщения (диодное Уравнение) ( $I_s$ )*	0,69144E-13	А
Паразитное сопротивление (последовательное сопротивление) ( $R_s$ )*	0.14	Ом
Обратное напряжение пробоя (BV)	1.4	В
Коэффициент эмиссии (N)	2	
Время переноса заряда (TT)	0	с
Емкость перехода при нулевом (CJO)	0	Ф
Контактная разность (VJ)	1	В
Коэффициент плавности перехода (M)	0.5	
Ширина запрещенной зоны для Шоттки (EG)	1.11	эВ
Температурный экспоненциальный коэффициент тока насыщения для Шоттки (XTI)	3	
Коэффициент фликер-шума (KF)	0	
Показатель степени в формуле фликер-шума (AF)	1	

Коэффициент емкости обедненной области при прямом смещении (FC)	0.5	
Обратный ток пробоя (IBV)	0.00005	A
Начальный ток пробоя низкого уровня (IBVL)	1 A	
Предельный ток при высоком уровне инжекции (IKF)	1.00E+30	A
Параметр тока рекомбинации (ISR)	0	A
Коэффициент неидеальности на участке пробоя (NBV)	1	
Коэффициент неидеальности на участке пробоя низкого уровня (NBVL)	1	
Коэффициент эмиссии для тока ISR (NR)	1	

Таблица 2 – SPICE модель диода

Остальные значения взяты по умолчанию с сайта  
<https://radioprogram.ru/post/210>

2. По заданным параметрам была создана схема и при помощи инструмента IV analyzer был построен график зависимости тока от напряжения.

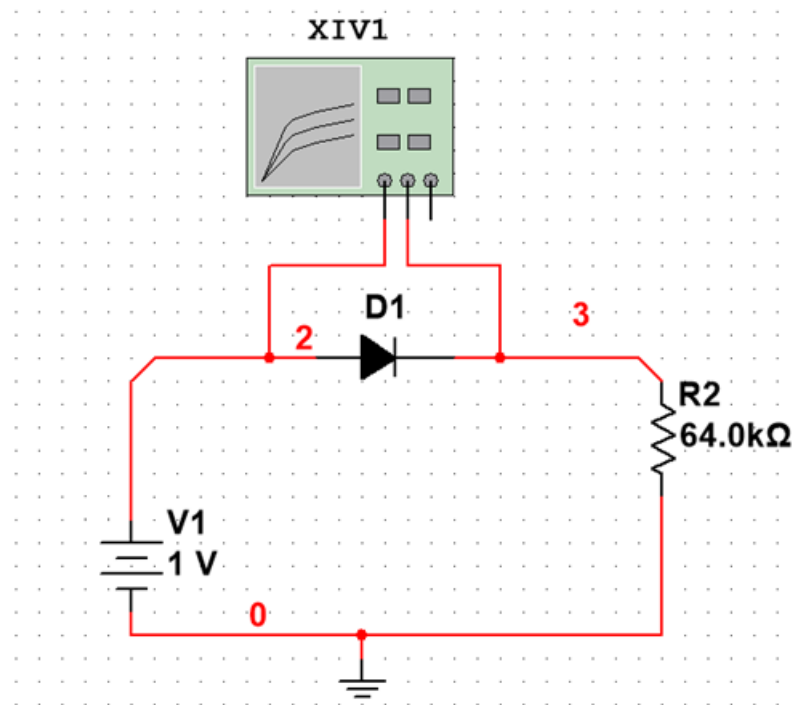


Рисунок 3 – Схема 1 воссозданная в Multisim

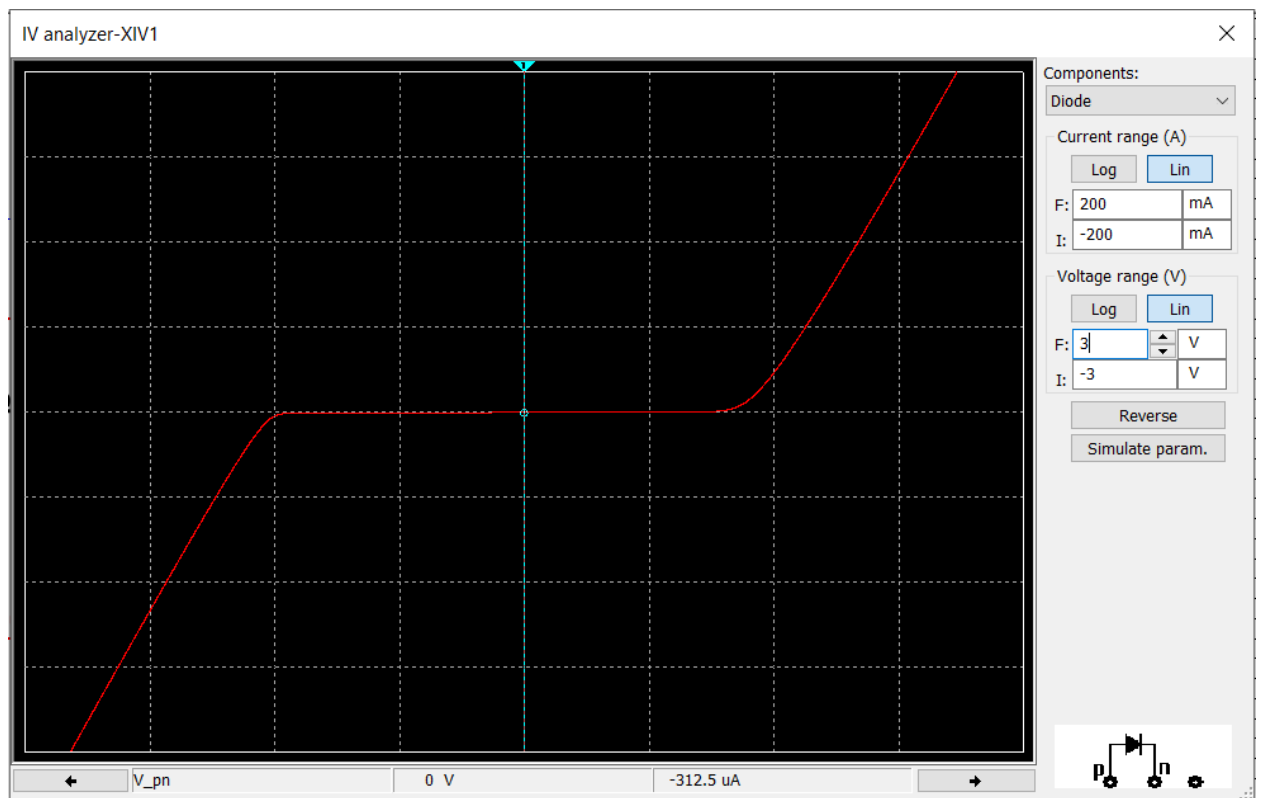


Рисунок 4 – График зависимости тока от напряжения в Multisim

Рассчитаем функцию зависимости тока от напряжения (вах):

$$\begin{aligned}
 I(U) &= I_{fwd} - I_{rev} = (I_n K_{inj} + I_r K_{gen}) - (I_{rev.hight} + I_{rev.low}) = \\
 &= \left( \left( IS \left\{ e^{\left[ \frac{U}{NR * \varphi_t} \right]} - 1 \right\} \right) \left( \sqrt{\frac{IKF}{IKF + \left( IS \left\{ e^{\left[ \frac{U}{NR * \varphi_t} \right]} - 1 \right\} \right)}} \right) + \right. \\
 &\quad \left( ISR \left\{ e^{\left[ \frac{U}{NR * \varphi_t} \right]} - 1 \right\} \right) \left( \left[ \left( \frac{1-V}{VJ} \right)^2 + 0.005 \right]^{\frac{M}{2}} \right) \\
 &\quad \left. - \left( \left( IBV * e^{\left[ -\frac{U+BV}{NBV * \varphi_t} \right]} \right) + \left( IBVL * e^{\left[ -\frac{U+BV}{NBVL * \varphi_t} \right]} \right) \right) \right) = \\
 &= ((0,69144 E - 13) \left\{ e^{\left[ \frac{U}{1*0.025} \right]} - 1 \right\} * \\
 &\quad * \left( \sqrt{\frac{(1.00E+30)}{(1.00E+30) + ((0,69144E-13) \left\{ e^{\left[ \frac{U}{1*0.025} \right]} - 1 \right\})}} \right) + \\
 &\quad + (0 * \left\{ e^{\left[ \frac{U}{1*0.025} \right]} - 1 \right\}) * \left( \left[ \left( \frac{1-V}{1} \right)^2 + 0.005 \right]^{\frac{M}{2}} \right) - \\
 &\quad - \left( (0.00005 * e^{\left[ -\frac{U+1.4}{1*0.025} \right]}) + (1 * e^{\left[ -\frac{U+1.4}{1*0.025} \right]}) \right) = \\
 &= ((0,69144E - 13) \left\{ e^{\left[ \frac{U}{1*0.025} \right]} - 1 \right\} * \\
 &\quad * \left( \sqrt{\frac{(1.00E + 30)}{(1.00E + 30) + ((0,69144E - 13) \left\{ e^{\left[ \frac{U}{1*0.025} \right]} - 1 \right\})}} \right) - \\
 &\quad - 1.00005 * e^{\left[ -\frac{U+1.4}{1*0.025} \right]}
 \end{aligned}$$

По полученной формуле был построен график зависимости тока от напряжения отдельно от multisim:

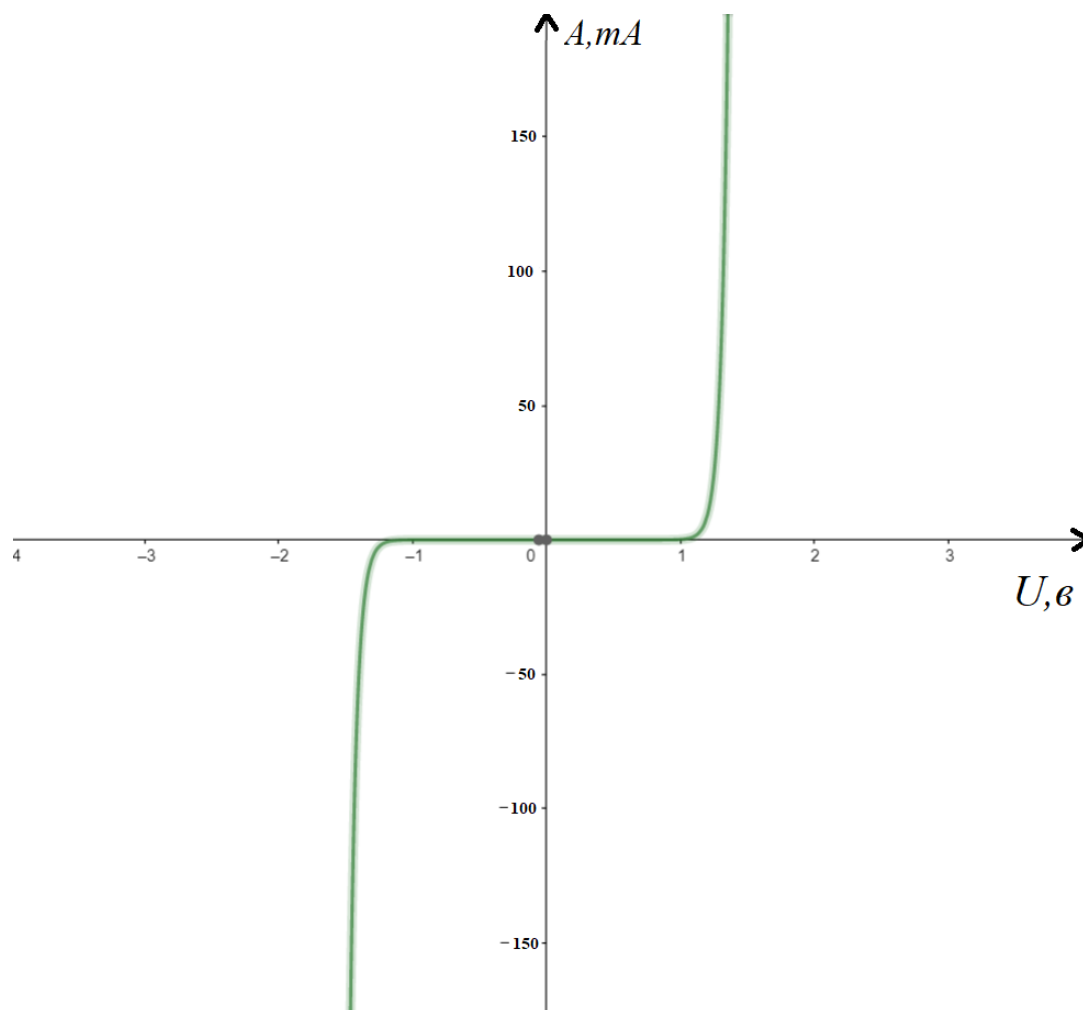


Рисунок 5 – График зависимости тока от напряжения



3. С учетом внутреннего сопротивления  $R_i$  перестроим предыдущую схему

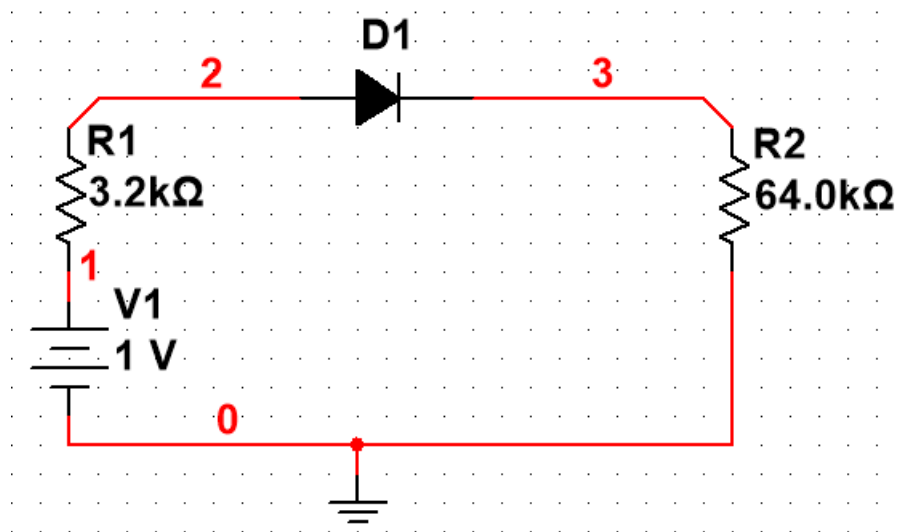


Рисунок 6 – Схема 2 воссозданная в Multisim

С помощью анализа dc sweep был построен график зависимости тока на диоде от напряжения источника

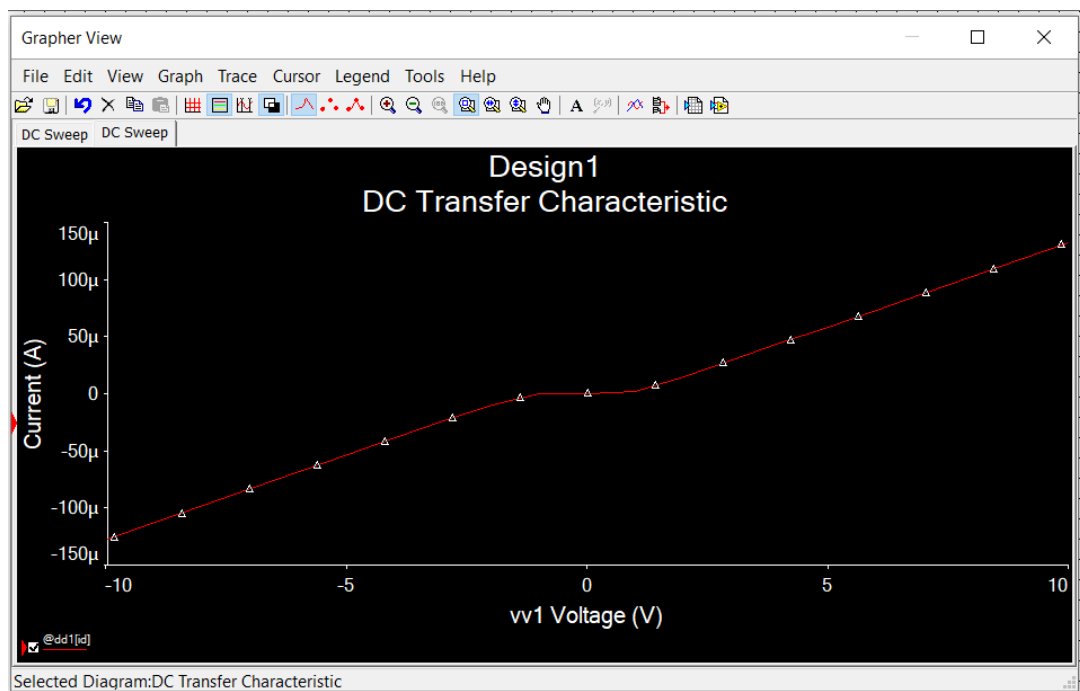


Рисунок 7 – График зависимости тока на диоде от напряжения источника

## Зависимость напряжения на диоде от входного напряжения

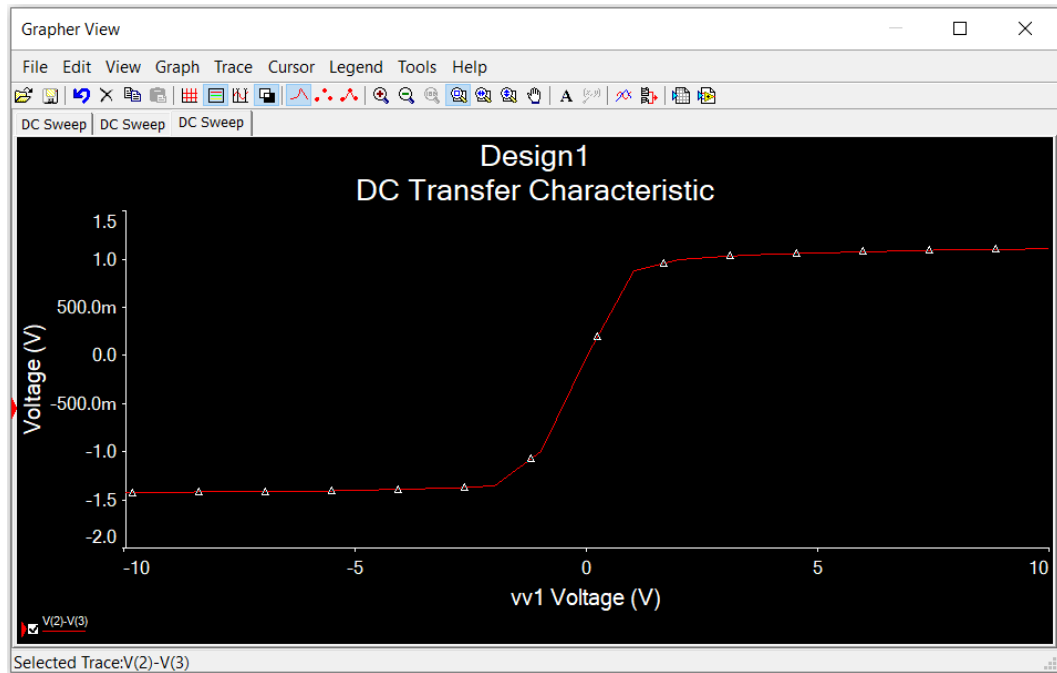


Рисунок 8 – График зависимости напряжения на диоде от входного напряжения

## Зависимость выходного напряжения от входного напряжения

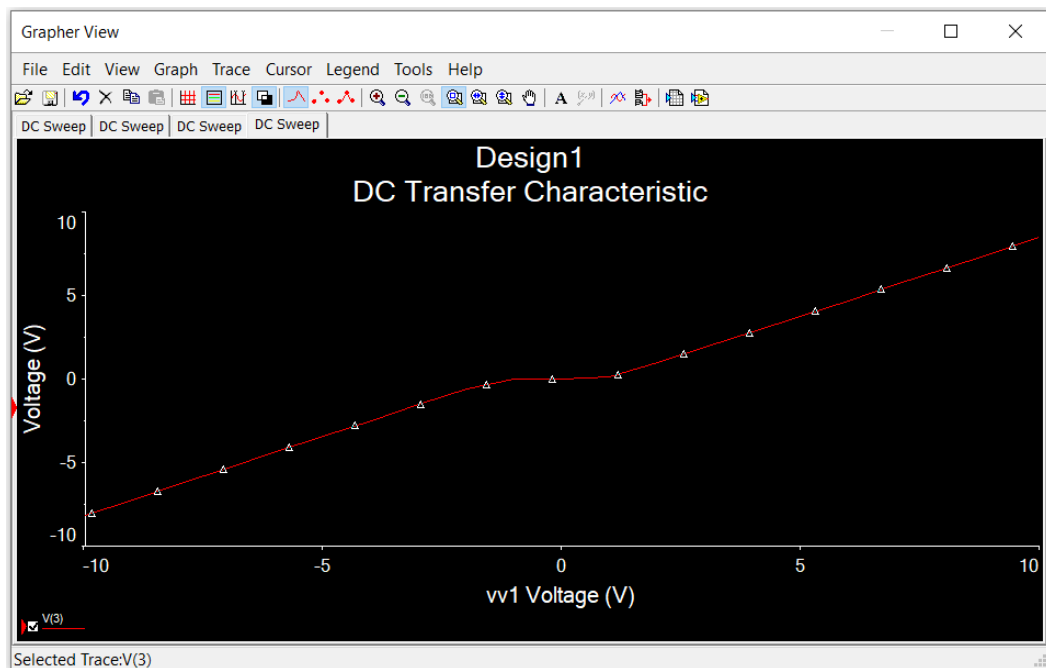


Рисунок 9 – График зависимости выходного напряжения от входного напряжения

Для построения зависимости тока, напряжения на диоде и выходного напряжения от входного напряжения я воспользовался функцией ВАХ  $I(U) = I_{fwd} - I_{rev}$  рассчитанной выше.

Затем необходимо было найти пересечение вах с линиями нагрузки, которые рассчитываются по формуле

$$\frac{E - U_g}{R_i + R_h} = I_g,$$

где  $E$  необходимо изменять от 0 до 10 В, а  $U_g$  - неизвестная.

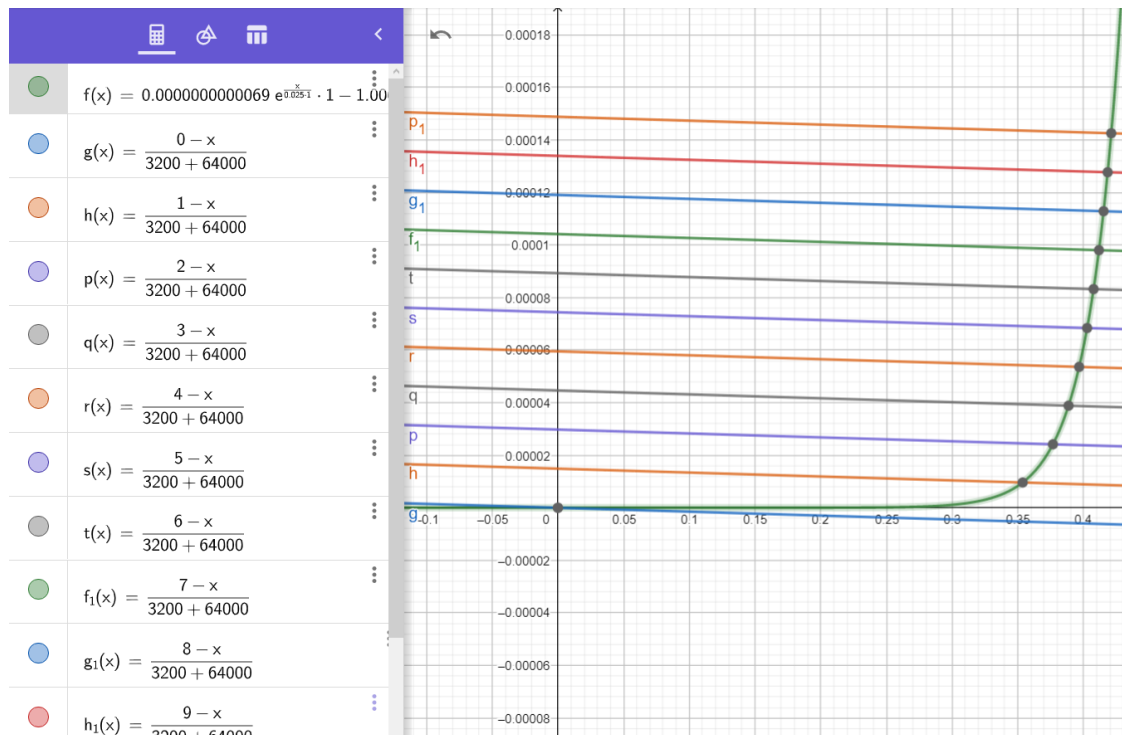


Рисунок 10 – Место пересечения графиков ВАХ и линий нагрузки

Находим точки пересечения

Е	(x,y)	$U_d = y * R_H$
0	0, 0	0
1	0.3536397, 0.0000096	0.6144
2	0.3766618, 0.0000242	1.5488
3	0.3885473, 0.0000389	2.4896
4	0.3965966, 0.0000536	3.4304
5	0.4026865, 0.0000684	4.3776
6	0.4075849, 0.0000832	5.3248
7	0.4116821, 0.0000980	6.272
8	0.4152033, 0.0001129	7.2256
9	0.4182905, 0.0001277	8.1728
10	0.4210389, 0.0001425	9.12

Таблица 3 – Точки пересечения ВАХ и линий нагрузки и напряжение на диоде

Затем также нужно соединить координаты точек при этом за координату Х надо брать Е, которое мы изменяем от 0 до 10, а за координату У берём координаты (Х, Y) точек пересечения, и отдельно координату У точки пересечения умноженной на сопротивление нагрузки. Эти линии и есть зависимости тока, напряжения на диоде и выходного напряжения от входного напряжения в диапазоне от 0 до 10 В.

График зависимости напряжения на выходе и на входе, график зависимости тока на диоде и напряжения на входе соответственно:

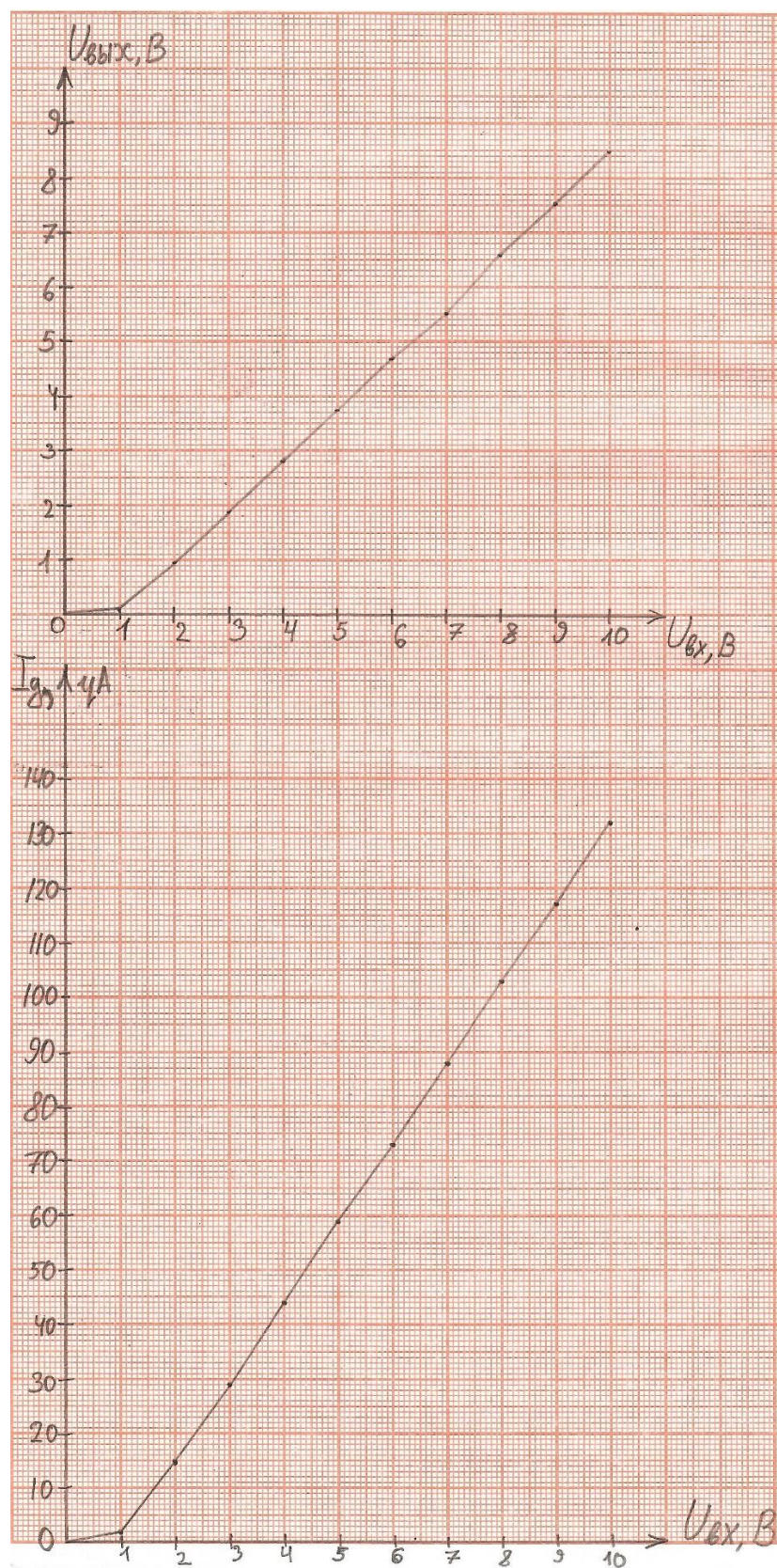


Рисунок 11 – График зависимости напряжения на выходе и на входе, график зависимости тока на диоде и напряжения на входе на миллиметровой бумаге



График зависимости напряжения на диоде и напряжения на входе:



Рисунок 12 – График зависимости напряжения на диоде и напряжения на входе на миллиметровой бумаге

4. Для построения графика выходного напряжения по времени при источнике напряжения в виде знакопеременного меандра я использовал классический метод.

По частоте находим период:  $T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{1000} = 0.001$ ,

Полупериод найдем по следующей формуле

$$T_{\text{пол}} = \frac{T \cdot 2}{4} = 0.0005,$$

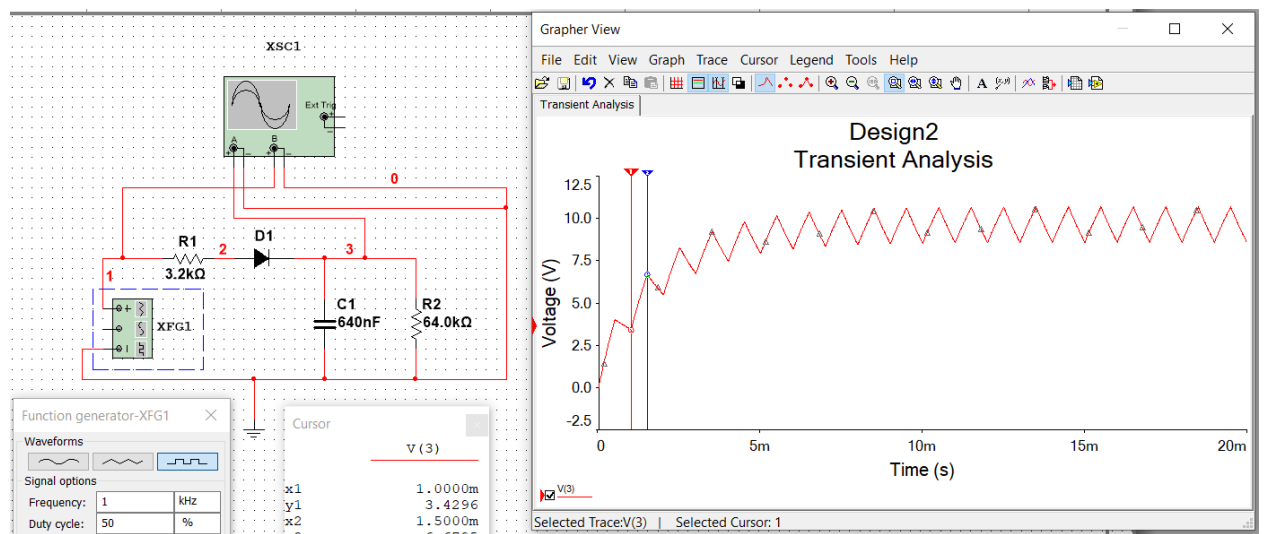


Рисунок 13 – График выходного напряжения по времени

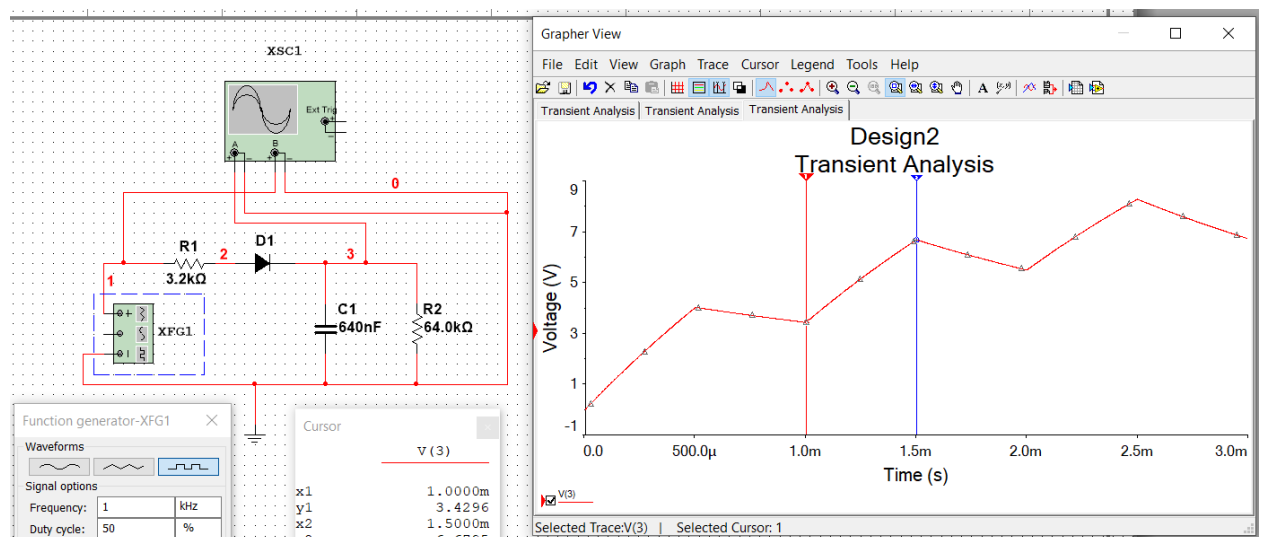


Рисунок 14 – График выходного напряжения по времени, приближение в несколько периодов

Найдем среднее значение и дельту минимума и максимума для второго полупериода:

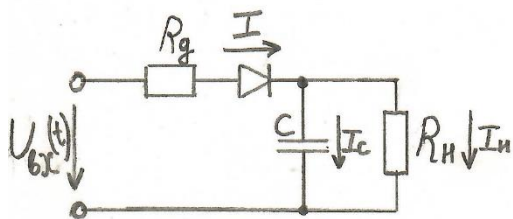
$$U_{\text{ср2}} = \frac{6.6795 + 3.4296}{2} = 5.05455V$$

$$U_{\text{дельта2}} = 6.6795 - 3.4296 = 3.2499V$$

Так как напряжение открытия диода считается равным 0.7В, мы будем рассматривать что напряжение на входе равно  $10V - 0.7V = 9.3V$ .



Для классического метода:



Марчук ИС  
УУБ-42Б

$$U_{вх} = 10В - 0,7В = 9,3В$$

По I и II закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} U_{вх}(t) = I(t) \cdot R_g + U_c(t) \\ 0 = -U_c(t) + I_H(t) R_H \\ \dot{I}(t) = \dot{I}_c(t) + \dot{I}_H(t) \end{cases}$$

$$I_c(t) = C \frac{dU_c}{dt}$$

$$\frac{U_{вх}(t) - U_c(t)}{R_g} = C \frac{dU_c}{dt} + \frac{U_c(t)}{R_H}$$

$$C \frac{dU_c}{dt} + U_c \left( \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_g} \right) = \frac{U_{вх}(t)}{R_g}$$

$$C \cdot p \cdot R_g + \left( \frac{R_H + R_g}{R_H} \right) = 0, \quad p = \frac{dU_c}{dt}$$

$$p = - \frac{R_H + R_g}{C \cdot R_g \cdot R_H} = - \frac{64000 + 3200}{640 \cdot 10^{-9} \cdot 3200 \cdot 64000} = -512,6953$$

$$T = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{1-512,7} = 1,95 \mu\text{с} \quad (\text{Время полной зарядки конденсатора})$$

$$f = 1000 \text{ Гц} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = 0,001 \text{ с}$$

$$t_0 = 0 \text{ с} \quad t_1 = \frac{T}{2} = 0,5 \mu\text{с} \quad t_2 = \frac{2T}{2} = 1 \mu\text{с} \quad t_3 = \frac{3T}{2} = 1,5 \mu\text{с} \quad t_4 = 2T = 2 \mu\text{с}$$

$$U_c(t) = U_{ср.} + U_{сб.}$$

$$U_c(t) = U_{ср.} + A e^{pt}$$

$$1) 0 < t \leq t_1, t_0 = 0$$

По закону коммутации:  $U_C(0-) = U_C(0+) = 0B$

$$U_{\text{ср.}} = \frac{U_{\text{ср.}}}{R_g + R_H} \cdot R_H = \frac{9,3}{67,2 \cdot 10^3} \cdot 64 \cdot 10^3 = 8,857B$$

$$A = -U_{\text{ср.}} \Rightarrow U_C(t_1) = 8,857 - 8,857 \cdot e^{-512,7 \cdot 0,0005} = 2,002B$$

$$2) t_1 \leq t \leq t_2$$

П.к. при отпр. меандре ток через 2-й контур не помечен:

$$C \cdot R_H \left( \frac{dU_C}{dt} \right)_p + U_C = 0 \Rightarrow p = -\frac{1}{C \cdot R_H} = -\frac{10^9 \cdot 10^{-3}}{640 \cdot 64} = -24,414$$

$$U_C(t_1+0) = U_C(t_1-0) = 2,002B$$

$$U_{\text{ср.}} = 0$$

$$2,002 = 0 + A \Rightarrow A = 2,002B$$

$$U_C(t_2) = 0 + 2,002 \cdot e^{-24,414 \cdot 0,001} = 1,9537B$$

$$3) t_2 \leq t \leq t_3$$

$$U_C(t_2+0) = U_C(t_2-0) = 1,9537B$$

$$U_{\text{ср.}} = 8,857B$$

$$1,9537 = 8,857 + A \Rightarrow A = -6,9033$$

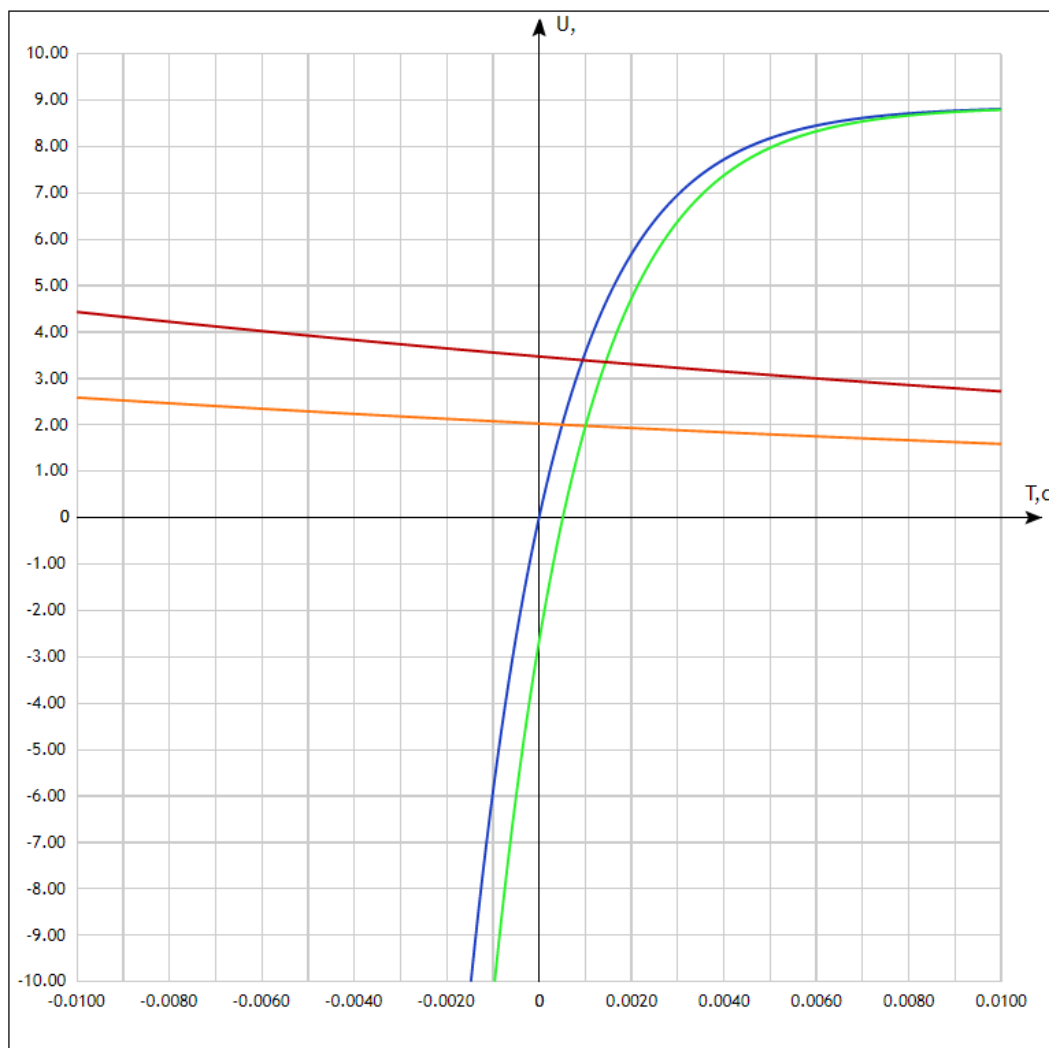
$$U_C(t_3) = 8,857 - 6,9033 \cdot e^{-512,7 \cdot 0,0015} = 5,65765B$$

$$4) t_3 \leq t \leq t_3$$

$$U_c(t_3+0) = U_c(t_3-0) = 5,65765\text{В}, U_{\text{снр.}} = 0\text{В}$$

$$A = 5,65765$$

$$U_c(t_4) = 5,65765 \cdot e^{-24,414 \cdot 0,002} = 5,388\text{В}$$



■  $y(x) = 8.857 - 8.857e^{-512.7x}$  [Показать таблицу точек](#)

■  $y(x) = 2.002e^{-24.414(x - \frac{1}{2000})}$  [Показать таблицу точек](#)

■  $y(x) = 8.857 - 6.903e^{-512.7(x - \frac{1}{1000})}$  [Показать таблицу точек](#)

■  $y(x) = 5.658e^{-24.414(x + \frac{1}{50})}$  [Показать таблицу точек](#)

Рисунок 14 – График выходного напряжения по первым двум периодам, построенный в программе

Таким образом, можно заметить, что графики ведут себя одинаково, различие лишь в точках, которое возникает по причине того, что в MathCAD мы используем линейную модель, а в Multisim нелинейную.

### **Вывод:**

В ходе решения домашнего задания был рассмотрен диод 2Д250А, исследованы переходные процессы в полупроводниковом диодном фильтре и поведение диода под воздействием меандра. Были проведены теоретический и практический расчеты.

### **Использованная литература:**

Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.