



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

**О Т Ч Е Т**

по домашнему заданию № 1  
Вариант 20

Название: Исследование характеристик и моделирование схем с  
полупроводниковыми диодами

Дисциплина: Электроника

Студент

ИУ6-426

(Группа)

08.03.2021

(Подпись, дата)

А.Е. Медведев

(И.О. Фамилия)

Преподаватель

В.А. Карпухин

(Подпись, дата)

(И.О. Фамилия)

2021 г.

## Домашнее задание №1

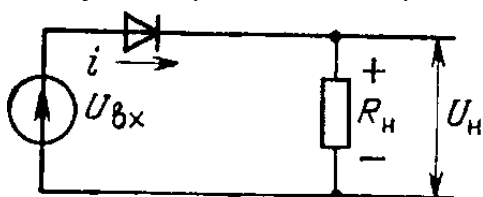
### По дисциплине «Электроника»

Для студентов 2 курса кафедры ИУ6, 2019 г.

#### Исследование характеристик и моделирование схем с полупроводниковыми диодами

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:



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  $R_n$  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:

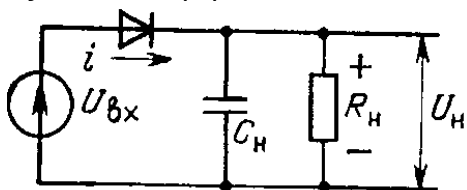
1) Аналитически любым методом (классическим, операторным, преобразования Лапласа, интеграла Дюамеля) в среде MathCAD.

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.



Вариант №	Тип диода	$R_i$ , кОм	$R_n$ , кОм	$C_1$ , нФ
20	2Д251А	3.09999999999999	62	670

# 1) Расчет SPICE модели:

Для данного диода найти подходящий аналог не удалось. Значения для расчетов взяты с сайта <http://chiplist.ru/diodes/2D251A/>

$\phi_t \approx 0.025$  – температурный потенциал

$$I_{np} = I_s * \left( e^{\frac{U_{np}}{\phi_t}} - 1 \right)$$

$$10 = I_s * \left( e^{\frac{50}{0.025 * 2}} - 1 \right)$$

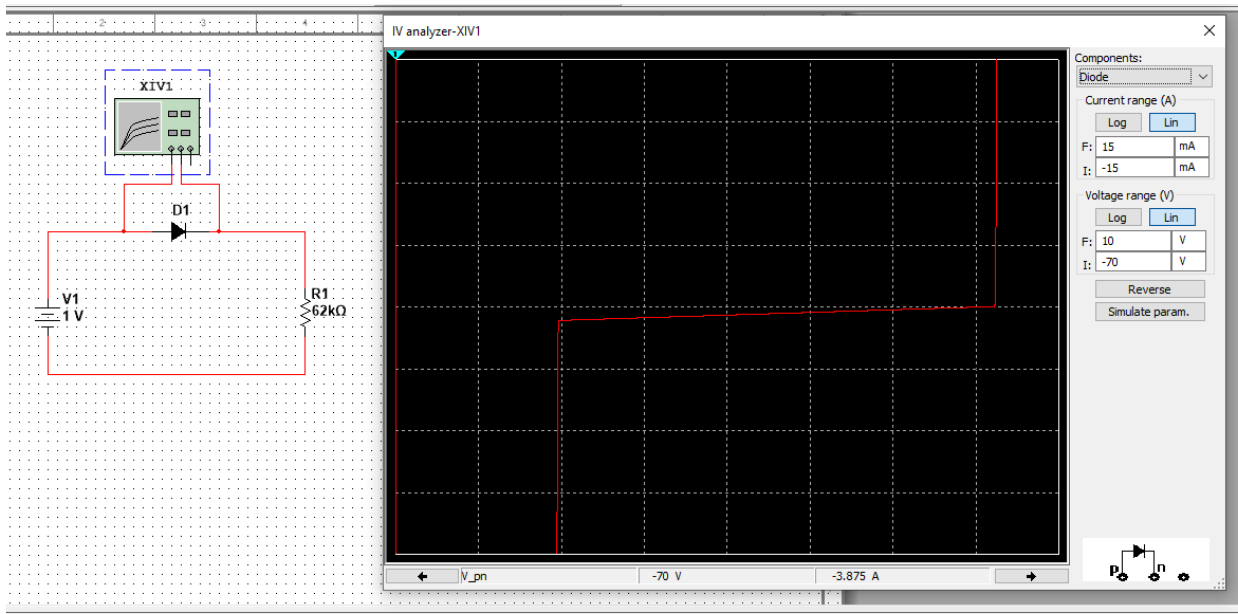
$$I_s = 3,72E-43$$

$$R_s = \frac{U_{np}}{I_{np}} = \frac{50}{10} = 5$$

Остальные значения взяты по умолчанию с мультисима

прямой ток Inp	10 A
прямое напряжение Unp	50 В
Ток насыщения (диодное Уравнение) (Is)*	3, 72E - 43 A
Паразитное сопротивление (последовательное сопротивление) (Rs)*	5 Ом
Обратное напряжение пробоя (BV)	50 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)	0.0000000001 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

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



Рассчитаем функцию зависимости тока от напряжения (вах):

$$I(U) = I_{fwd} - I_{rev} = (I_n K_{inj} + I_r K_{gen}) - (I_{rev.hight} + I_{rev.low}) =$$

$$= \left( IS \left\{ e^{\left[ \frac{U}{NR * \varphi_t} \right]} - 1 \right\} \right) \left( \sqrt{\frac{IKF}{IKF + \left( IS \left\{ e^{\left[ \frac{U}{NR * \varphi_t} \right]} - 1 \right\} \right)}} + \left( I SR \left\{ e^{\left[ \frac{U}{NR * \varphi_t} \right]} - 1 \right\} \right) \left( \left[ \left( \frac{1-V}{VJ} \right)^2 + 0.005 \right]^{\frac{M}{2}} \right) \right) -$$

$$- \left( \left( IBV * e^{\left[ \frac{-U+BV}{NBV * \varphi_t} \right]} \right) + \left( IBVL * e^{\left[ \frac{-U+BV}{NBVL * \varphi_t} \right]} \right) \right) = \left( 3,72E-43 * \left( e^{\left[ \frac{U}{2 * 0.025} \right]} - 1 \right) \right) *$$

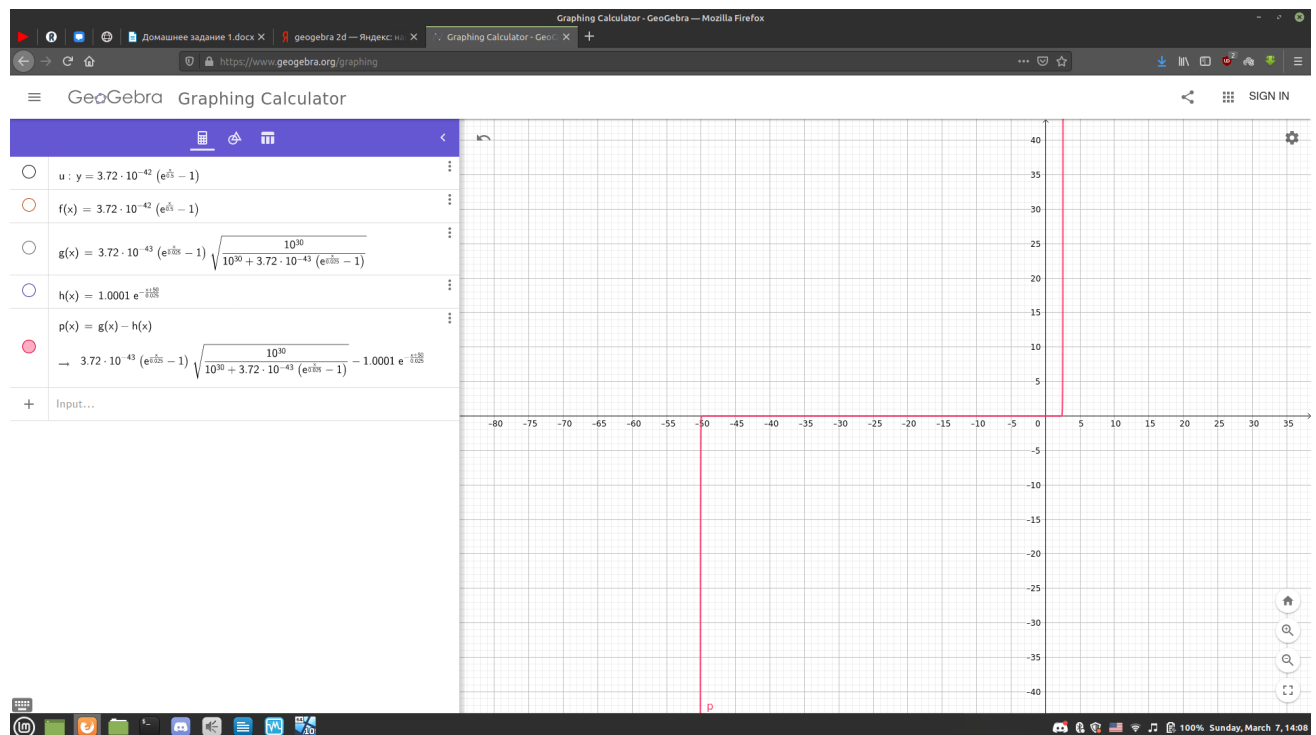
$$\left( \sqrt{\frac{(1.00E+30)}{(1.00E+30) + \left( (3,72E-43) \left\{ e^{\left[ \frac{U}{2 * 0.025} \right]} - 1 \right\} \right)}} \right) +$$

$$+ \left( 0 * \left\{ e^{\left[ \frac{U}{2 * 0.025} \right]} - 1 \right\} \right) * \left( \left[ \left( \frac{1-V}{1} \right)^2 + 0.005 \right]^{\frac{M}{2}} \right) - \left( \left( 0.0000000001 * e^{\left[ \frac{-U+1.4}{2 * 0.025} \right]} \right) + \left( 1 * e^{\left[ \frac{-U+50}{2 * 0.025} \right]} \right) \right) =$$

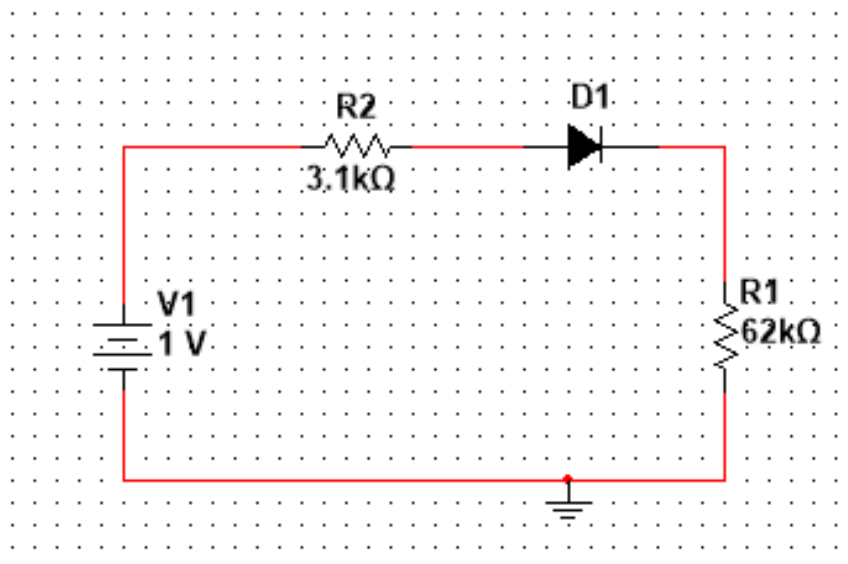
$$\left( \sqrt{\frac{(1.00E+30)}{(1.00E+30) + \left( (3,72E-43) \left\{ e^{\left[ \frac{U}{2 * 0.025} \right]} - 1 \right\} \right)}} \right) -$$

$$- 1.0000000001 * e^{\left[ \frac{-U+50}{2 * 0.025} \right]}$$

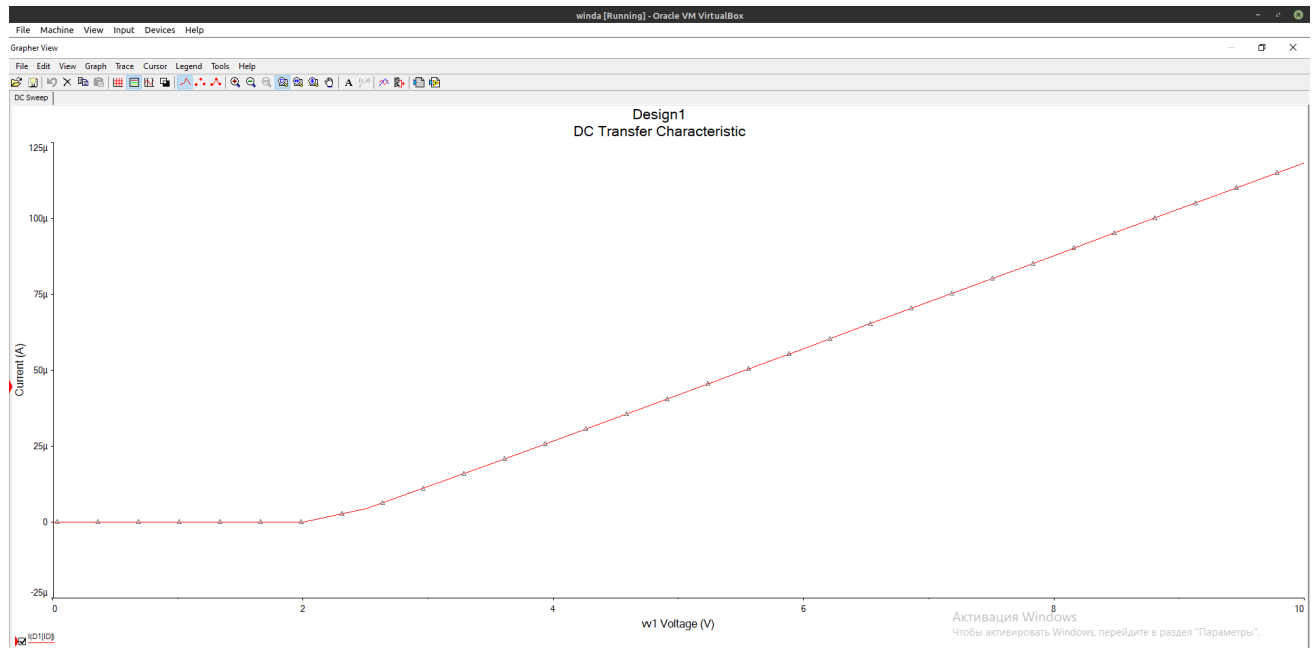
По полученной формуле был построен график зависимости тока от напряжения отдельно от multisim:



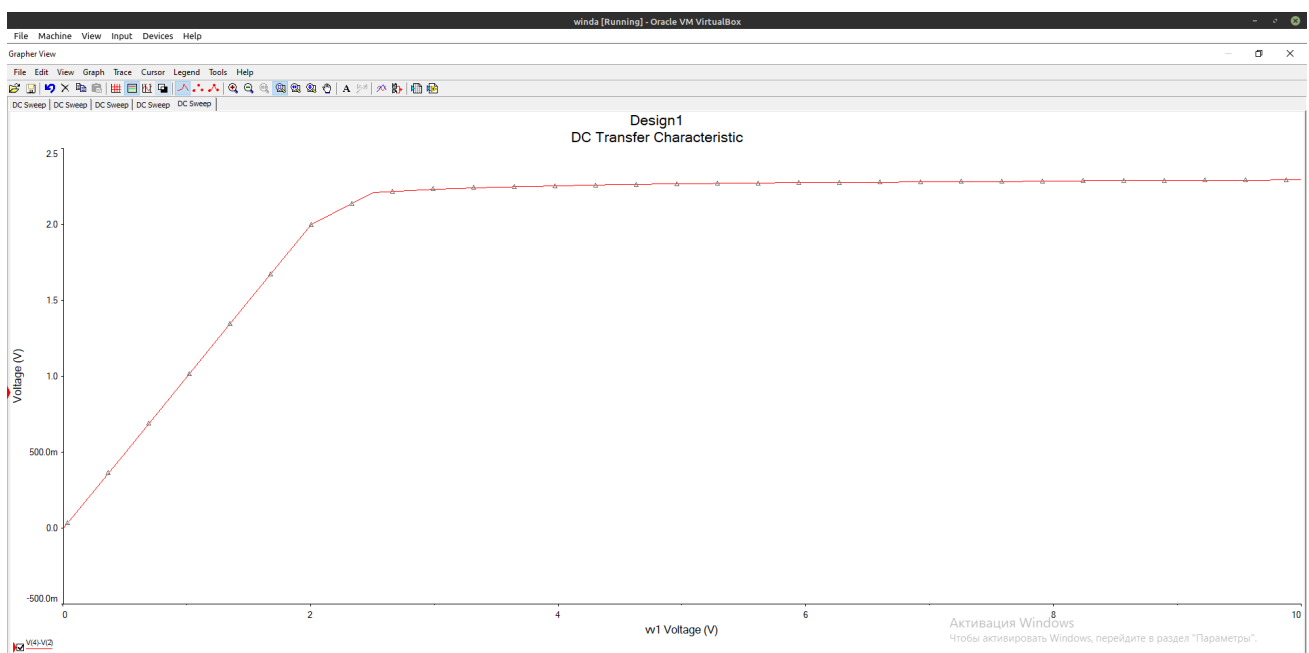
3) С учетом внутреннего сопротивления  $R_i$  перестроим предыдущую схему



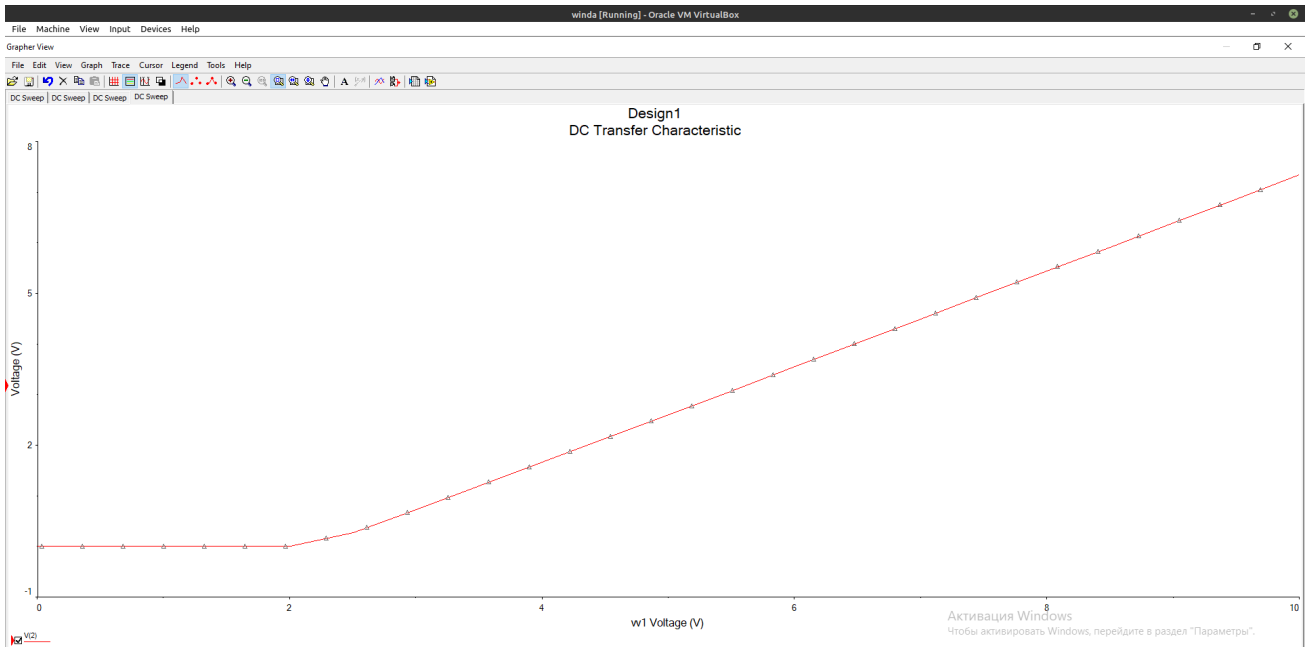
С помощью анализа dc sweep был построен график зависимости тока на диоде от напряжения источника



Зависимость напряжения на диоде от входного напряжения



## Зависимость выходного напряжения от входного напряжения

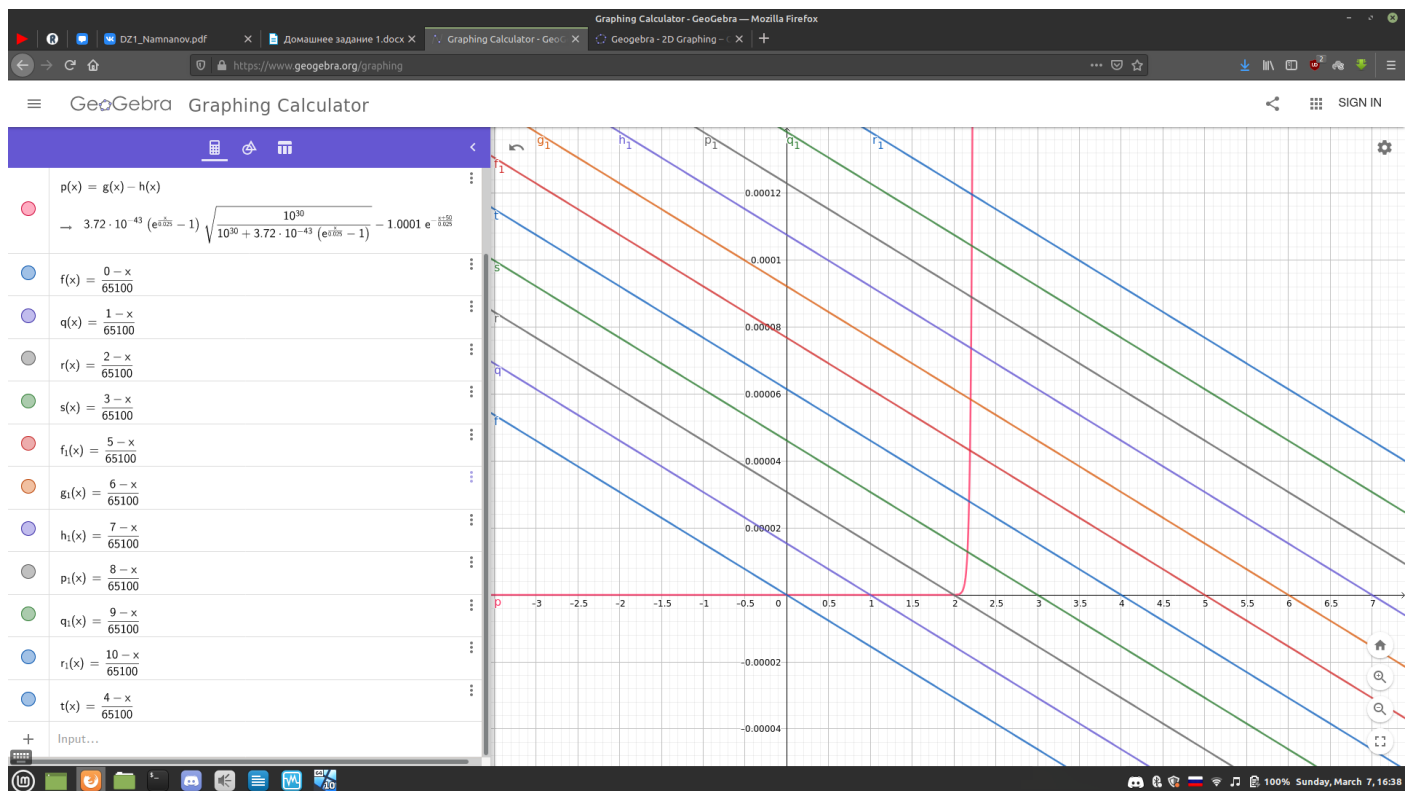
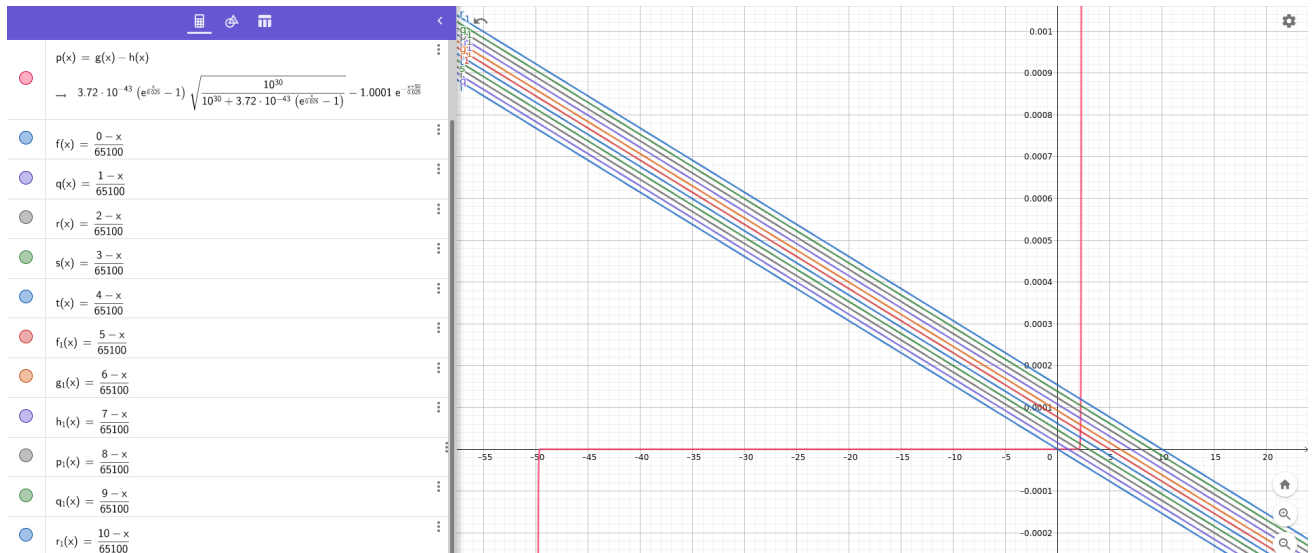


Для построения зависимости тока, напряжения на диоде и выходного напряжения от входного напряжения я воспользовался функцией ВАХ  $I(U) = I_{fwd} - I_{rev}$  рассчитанной выше.

Затем находим 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





## Находим точки пересечения

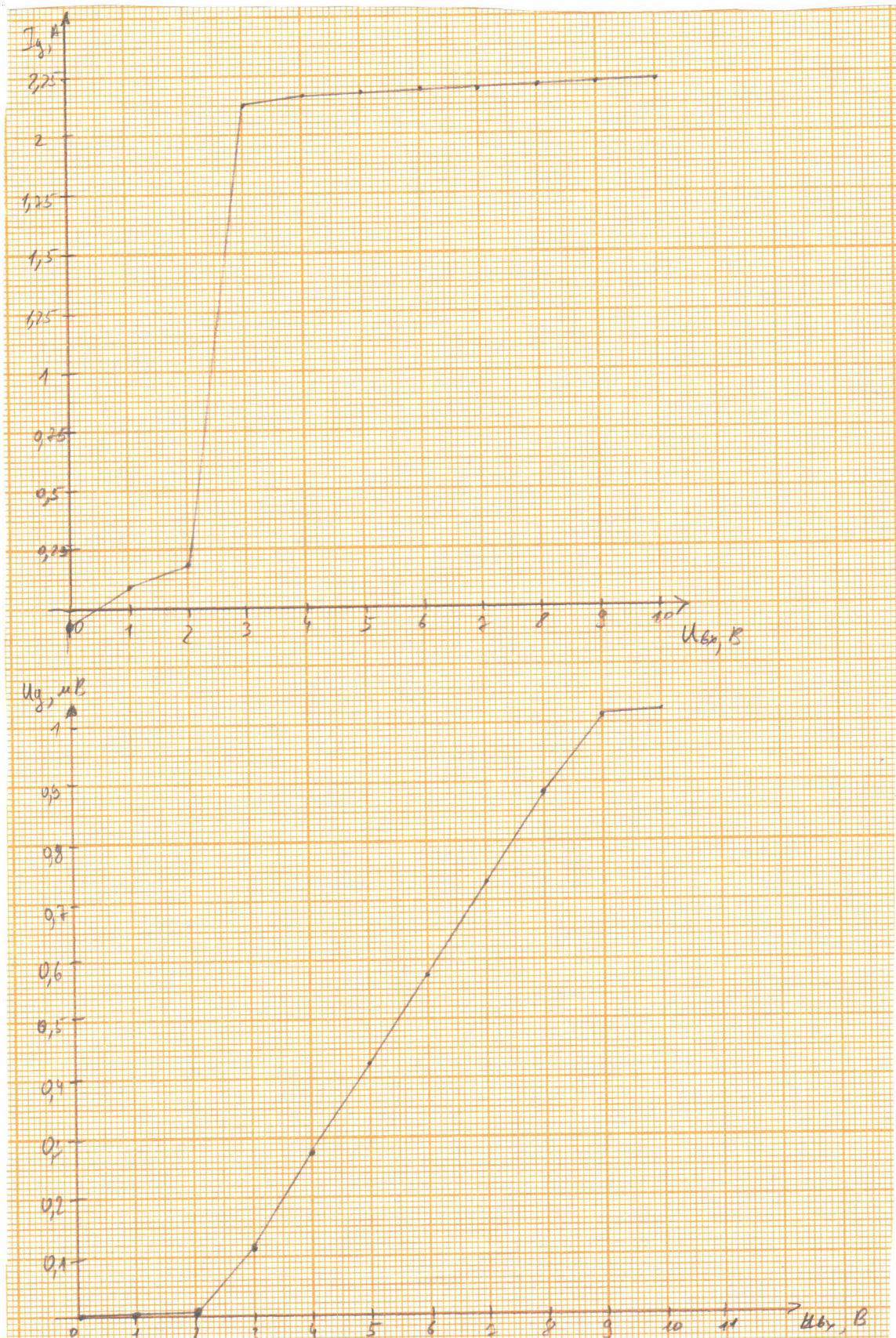
E	(x,y)	$U_D = y * R_H$
0	-0.006 0	0
1	0.1 0.0	0
2	0.1999 0.0	0
3	2.16 0.0000129	0.7998
4	2.18 0.0000279	1.7298
5	2.1911 0.0000432	2.6784
6	2.199 0.00005839	3.62
7	2.205 0.0000737	4.5694
8	2.209 0.0000889	5.5118
9	2.213 0.000104	6.448
10	2.217 0.00012	7.14

Затем также нужно соединить координаты точек при этом за координату X надо брать E, которое мы изменяем от 0 до 10, а за координату Y берём координаты (X, Y) точек пересечения, и отдельно координату Y 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.







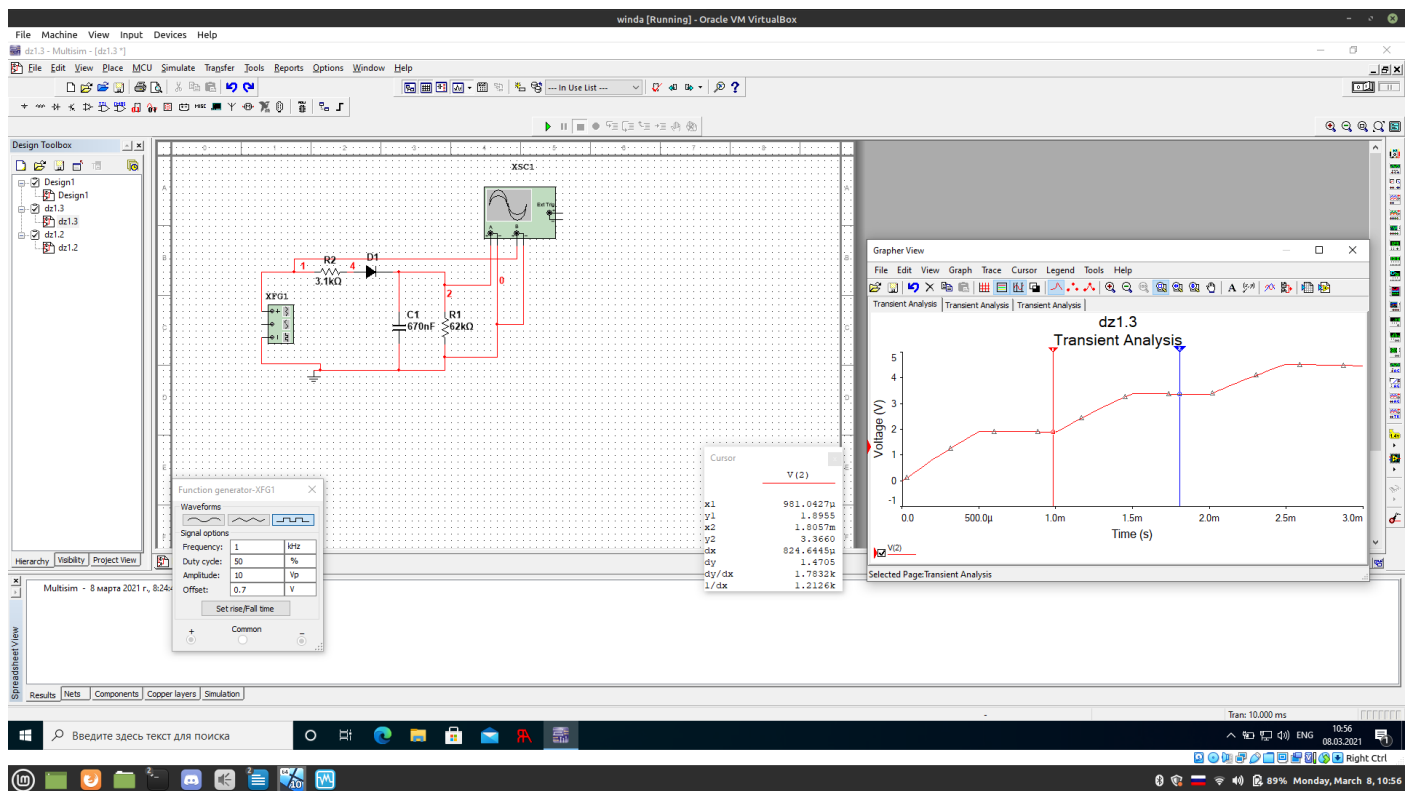
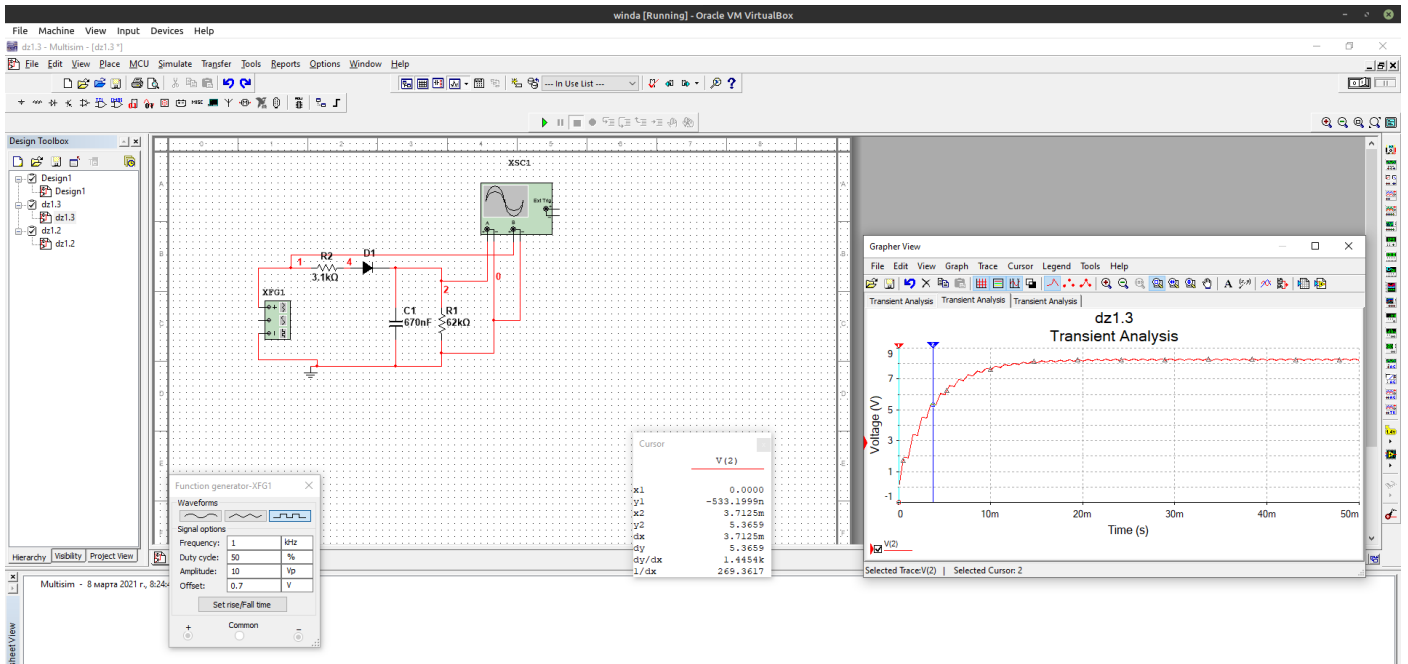
4) Для построения графика выходного напряжения от времени при источнике напряжения в виде знакопеременного меандра я использовал классический метод.

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

Полупериод найдем по следующей формуле

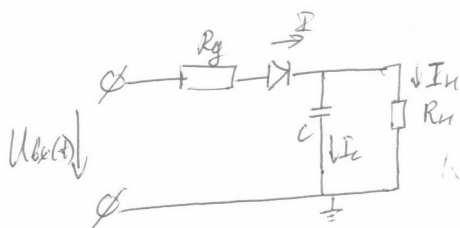


$$T_{not} = \frac{T * 2}{4} = 0.0005$$



Так как напряжение открытия диода считается равным 0.7, мы будем рассматривать что напряжение на входе равно  $10 - 0.7 = 9.3$   
Тогда получим такую схему для положительной полуволны  
Для классического метода:

N 4.



Мегбегел  
U<sub>б</sub> = 10 В

$$U_{b0} = 10 \text{ В} - 0,7 \text{ В} = 9,3 \text{ В}$$

По I и II зм. Киргофа.

$$\begin{cases} U_{b0}(t) = \dot{I}(t) R_g + U_c(t) \\ 0 = -U_c(t) + \dot{I}_n(t) R_n \\ \dot{I}(t) = \dot{I}_c(t) + \dot{I}_n(t) \end{cases} \quad \dot{I}_c(t) = C \frac{dU_c}{dt}$$

$$\frac{U_{b0}(t) - U_c(t)}{R_g} = C \frac{dU_c}{dt} + \frac{U_c(t)}{R_n}$$

$$C \frac{dU_c}{dt} + U_c \left( \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_g} \right) = \frac{U_{b0}(t)}{R_g}$$

$$C_p R_g + \left( \frac{R_n + R_g}{R_n} \right) = 0$$

$$p = - \frac{R_n + R_g}{C R_g R_n} = -500$$

$$\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{1-500} = 2 \text{ мс}$$

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

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

$$U_c(t) = U_{cnp} + U_{cd}$$

$$U_c(t) = U_{cnp} + A e^{pt}$$

1)  $0 < t \leq t_1$

$$t_0 = 0$$

По зм. контура  $U_c(0-) = U_c(0+) = 0 \text{ В}$

$$U_{cnp} = \frac{U_{b0}}{R_g + R_n} \cdot R_n = \frac{9,3}{65,1 \cdot 10^3} \cdot 62 \cdot 10^3 = 8,86 \text{ В}$$

$$A = -U_{cnp} \Rightarrow U_c(t_1) = 8,86 - 8,86 e^{-500 \cdot 0,0005} = 1,96 \text{ В}$$

2)  $t_1 \leq t \leq t_2$

т.к. при срабатывании диода весь 2-й контур из резисторов

$$C R_n \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0 \Rightarrow p = - \frac{1}{C R_n} = - \frac{10^9 \cdot 10^{-3}}{640 \cdot 62} = -24,07$$

$$U_{cn}(t_1) = U_{cn}(t_1) = 1,96$$

$$U_{cnp} = 0$$

$$1,96 = 0 + A \Rightarrow A = 1,96$$

$$U_c(t_2) = 0 + 1,96 e^{-24,07 \cdot 0,001} = 1,91$$

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

$$U_{CH}(t_2) = U_{CK}(t_2) = 1,91$$

$$U_{CH} = 8,86 \quad -1,91 = 8,86 + A \Rightarrow A = -6,95$$

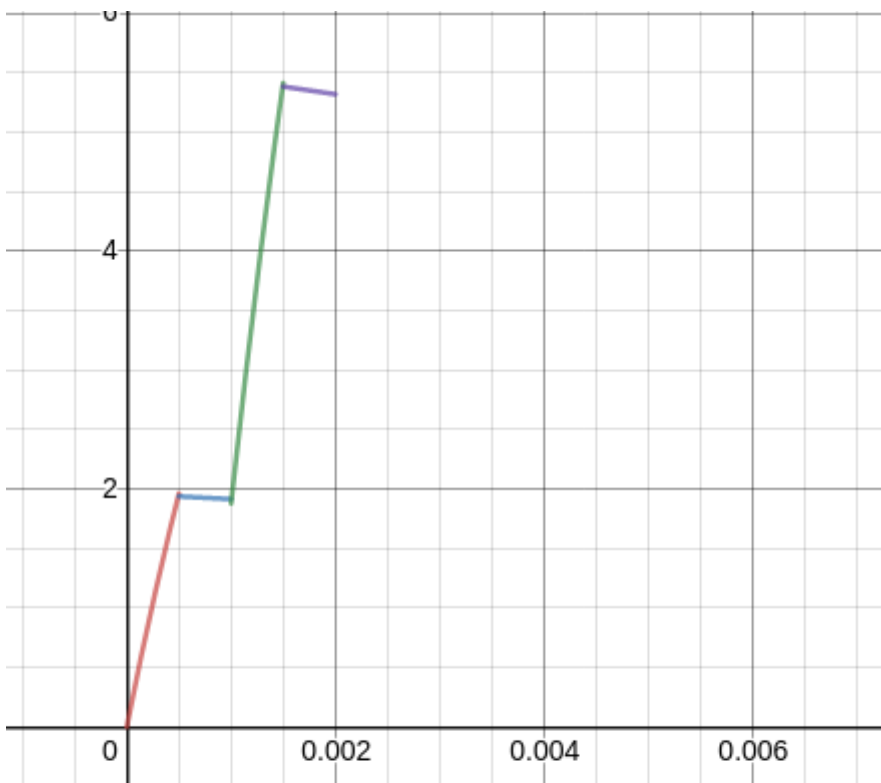
$$U_C(t_3) = 8,86 - 6,95 e^{-500 \cdot 0,0015} = 5,58$$

$$4) \quad t_3 \leq t \leq t_4$$

$$U_{CH}(t_3) = U_{CK}(t_3) = 5,58; \quad U_{CH} = 0$$

$$A = 5,58;$$

$$U_C(t_4) = 5,58 e^{-24,07 \cdot 0,002} = 5,32 \text{ В}$$



**Вывод:** В ходе решения домашнего задания был рассмотрен диод 2Д251А, исследованы переходные процессы в полупроводниковом диодном фильтре.