**Цель работы:** изучить переходные процессы в простейших цепях при подключении к источнику напряжения прямоугольной формы.

## 1 Задание на предварительный расчёт

Исходные данные для расчета:

$$U_0 = 2 \text{ В};$$

$$L = L_A = 45 \text{ мГн}; R_{min} = R_M = 160 \text{ Ом}; R_{max} = 2\cdot R_M = 320 \text{ Ом};$$

$$C = C_D = 99{,}1 \text{ нФ}; R_{min} = R_M = 2560 \text{ Ом}; R_{max} = 2\cdot R_M = 5120 \text{ Ом}.$$

1.1 Рассчитать переходной процесс для схемы рисунка 1 для двух значений сопротивления $R_M$ за время, равное двум периодам воздействующего напряжения.

Напряжение источника питания выбрать $U_0$ = 2 В, частоту источника рассчитать по формуле

$$f = \frac{1}{8 \cdot \tau_{min}} = \frac{R_{max}}{8 \cdot L},$$

где $R_{max}$ – максимальное сопротивление цепи в этом опыте.

Частота источника равна:

$$f = \frac{R_{max}}{8 \cdot L} = 320/(8\cdot 45\cdot 10^{-3}) = 889 \text{ Гц}.$$

Период равен:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{889} = 1{,}125 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

По результатам расчета построить друг под другом графики изменения водного напряжения u(t), тока i(t), напряжения на индуктивности $u_L(t)$ для двух значений сопротивления $R_M$. Построить фазовые портреты переходного процесса $i`_L(i_L)$ для двух значений сопротивления контура.

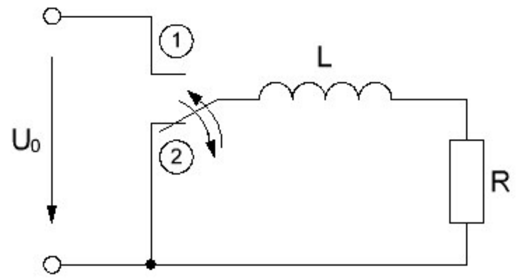



Рисунок 1 – Схема электрической цепи

1.2 Рассчитать переходной процесс для схемы рисунка 1, заменив индуктивность L на емкость $C_B$, аналогично п.1.1. Напряжение выбрать $U_0$ = 2 В, частоту источника рассчитать по формуле

$$f = \frac{1}{8 \cdot R_{min} \cdot C},$$

где $R_{min}$ – минимальное сопротивление цепи в этом опыте.

Частота источника равна:

$$f = \frac{1}{8 \cdot R_{min} \cdot C} = 1/(8\cdot 2560\cdot 99{,}1\cdot 10^{-9}) = 493 \text{ Гц}.$$

Период равен:

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{493}=2{,}028\cdot 10^{-3}\ \text{c}.$$

## 2 Предварительный расчёт

### 2.1 Расчет переходного процесса для RL цепи

2.1.1 Расчет переходного процесса при подключении источника

Схема электрической цепи представлена на рисунке 2.

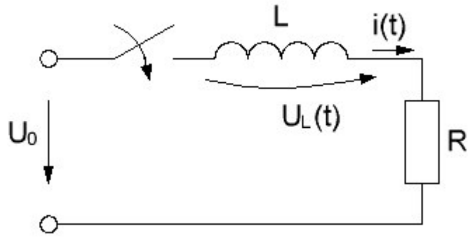



Рисунок 2 – Схема электрической цепи при подключении источника

Расчетное уравнение имеет вид:

$$u_L+u_R=U_0 \Rightarrow L\frac{di}{dt}+i\cdot R=U_0 .$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$i(t)=i_{ПР}(t)+i_{СВ}(t) .$$

До начало коммутации ток в цепи равен:

$$i(0-)=0\ \text{А}.$$

Независимые начальные условия равны:

$$i(0+)=i(0-)=0\ \text{А}.$$

Зависимые начальные условия равны:

$$U_L(0+)+i(0+)\cdot R=U_0 ,$$

$$U_L(0+)=U_0-i(0+)\cdot R=2-0=2\ \text{В}.$$

Принужденная составляющая равна:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом имеем $i_{ПР}(t)=U_0/R$ = 2/320 = $6{,}25\cdot 10^{-3}$ А;
- при R = $R_{min}$ = 160 Ом имеем $i_{ПР}(t)=U_0/R$ = 2/160 = $12{,}5\cdot 10^{-3}$ А.

Расчет характеристического уравнения:

$$L\frac{di_{СВ}(t)}{dt}+i_{СВ}\cdot R=0,$$

где $i_{СВ}(t)=Ae^{pt}$ – вид свободной составляющей для дифференциального уравнения первого порядка.

$$\frac{di_{СВ}(t)}{dt}=\frac{d[Ae^{pt}]}{dt}=pAe^{pt} \Rightarrow L\cdot pAe^{pt}+Ae^{pt}\cdot R=0,$$

$$Lp+R=0 .$$

Корень характеристического уравнения равен:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом имеем $p=R/L$ = 320/45$\cdot 10^{-3}$ = 7111,1 $c^{-1}$;

- при $R = R_{min}$ = 160 Ом имеем $p = R/L = 160/45\cdot10^{-3} = 3555{,}6\ c^{-1}$.

Время переходного процесса равно:

- при $R = R_{max}$ = 320 Ом

$$\tau = 1/p = 1/7111{,}1 = 0{,}141\cdot10^{-3}\ c;$$

$$t_{\Pi\Pi} = 3\tau = 3\cdot0{,}141\cdot10^{-3} = 0{,}423\cdot10^{-3}\ c;$$

- при $R = R_{min}$ = 160 Ом

$$\tau = 1/p = 1/3555{,}6 = 0{,}281\cdot10^{-3}\ c;$$

$$t_{\Pi\Pi} = 3\tau = 3\cdot0{,}281\cdot10^{-3} = 0{,}843\cdot10^{-3}\ c.$$

Полное решение для тока имеет вид:

$$i(t) = i_{\Pi P}(t) + i_{CB}(t) = i_{\Pi P}(t) + Ae^{pt}.$$

Учитывая начальные условия, получим:

- при $R = R_{max}$ = 320 Ом

$$i(0+) = 6{,}25\cdot10^{-3} + Ae^{0} \Rightarrow 0 = A + 6{,}25\cdot10^{-3};$$

$$A = 6{,}25\cdot10^{-3};$$

- при $R = R_{min}$ = 160 Ом

$$i(0+) = 12{,}5\cdot10^{-3} + Ae^{0} \Rightarrow 0 = A + 12{,}5\cdot10^{-3};$$

$$A = 12{,}5\cdot10^{-3}.$$

Выражение для тока имеет вид:

- при $R = R_{max}$ = 320 Ом

$$i(t) = 6{,}25\cdot10^{-3} - 6{,}25\cdot10^{-3}e^{-7111{,}1\cdot t};$$

- при $R = R_{min}$ = 160 Ом

$$i(t) = 12{,}5\cdot10^{-3} - 12{,}5\cdot10^{-3}e^{-3555{,}6\cdot t}.$$

Напряжения на катушке индуктивности равно:

$$u_L(t) = L\frac{d}{dt}i(t) = L\frac{d}{dt}[i_{\Pi P}(t) + i_{CB}(t)] = L\cdot p\cdot Ae^{pt},\ \text{тогда}$$

- при $R = R_{max}$ = 320 Ом

$$u_L(t) = 45\cdot10^{-3}\cdot(-7111{,}1)\cdot(-6{,}25\cdot10^{-3})\cdot e^{-7111{,}1\cdot t} = 2\cdot e^{-7111{,}1\cdot t}\ B;$$

- при $R = R_{min}$ = 160 Ом

$$u_L(t) = 45\cdot10^{-3}\cdot(-3555{,}6)\cdot(-12{,}5\cdot10^{-3})\cdot e^{-3555{,}6\cdot t} = 2\cdot e^{-3555{,}6\cdot t}\ B.$$

2.1.2 Расчет переходного процесса при отключении от источника

Схема электрической цепи представлена на рисунке 3.

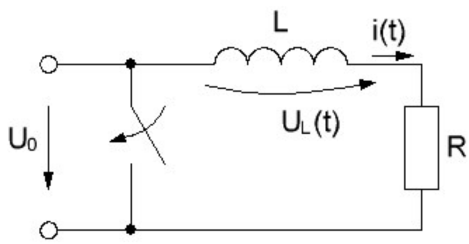



Рисунок 3 – Схема электрической цепи при отключении от источника

Расчетное уравнение имеет вид:

$$u_L + u_R = 0 \Rightarrow L\frac{di}{dt} + i\cdot R = 0.$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$i(t) = i_{ПР}(t) + i_{СВ}(t).$$

До начало коммутации ток в цепи равен:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом имеем $i(0-) = U_0 / R$ = 2/320 = $6{,}25 \cdot 10^{-3}$ А;
- при R = $R_{min}$ = 160 Ом имеем $i(0-) = U_0 / R$ = 2/160 = $12{,}5 \cdot 10^{-3}$ А.

Независимые начальные условия равны:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом имеем $i(0+) = i(0-) = 6{,}25 \cdot 10^{-3}$ А;
- при R = $R_{min}$ = 160 Ом имеем $i(0+) = i(0-) = 12{,}5 \cdot 10^{-3}$ А.

Зависимые начальные условия равны:

$$U_L(0+) + i(0+) \cdot R = 0, \text{ тогда}$$

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом

$$U_L(0+) = -i(0+) \cdot R = -6{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 320 = -2 \text{ В};$$

- при R = $R_{min}$ = 160 Ом

$$U_L(0+) = -i(0+) \cdot R = -12{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = -2 \text{ В}.$$

Принужденная составляющая равна:

$$i_{ПР}(t) = 0 \text{ А}.$$

Расчет характеристического уравнения:

$$L \frac{di_{СВ}(t)}{dt} + i_{СВ} \cdot R = 0,$$

где $i_{СВ}(t) = Ae^{pt}$ – вид свободной составляющей для дифференциального уравнения первого порядка.

$$\frac{di_{СВ}(t)}{dt} = \frac{d[Ae^{pt}]}{dt} = pAe^{pt} \Rightarrow L \cdot pAe^{pt} + Ae^{pt} \cdot R = 0,$$

$$Lp + R = 0.$$

Корень характеристического уравнения равен:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом имеем $p = R / L$ = 320/45$\cdot 10^{-3}$ = 7111,1 $с^{-1}$;
- при R = $R_{min}$ = 160 Ом имеем $p = R / L$ = 160/45$\cdot 10^{-3}$ = 3555,6 $с^{-1}$.

Время переходного процесса равно:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом

$$\tau = 1/p = 1/7111{,}1 = 0{,}141 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$t_{ПП} = 3\tau = 3 \cdot 0{,}141 \cdot 10^{-3} = 0{,}423 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

- при R = $R_{min}$ = 160 Ом

$$\tau = 1/p = 1/3555{,}6 = 0{,}281 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$t_{ПП} = 3\tau = 3 \cdot 0{,}281 \cdot 10^{-3} = 0{,}843 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Полное решение для тока имеет вид:

$$i(t) = i_{ПР}(t) + i_{СВ}(t) = i_{ПР}(t) + Ae^{pt}.$$

Учитывая начальные условия, получим:

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом

$$i(0+) = 0 + Ae^{0} \Rightarrow 6{,}25 \cdot 10^{-3} = 0 + A;$$

$$A = 6{,}25 \cdot 10^{-3};$$

- при R = $R_{min}$ = 160 Ом

$$i(0+) = 0 + Ae^{0} \Rightarrow 12{,}5 \cdot 10^{-3} = 0 + A;$$

$$A = 12{,}5 \cdot 10^{-3}.$$

Выражение для тока имеет вид:
- при R = $R_{max}$ = 320 Ом

$$i(t) = 6{,}25 \cdot 10^{-3}\, e^{-7111{,}1 \cdot t};$$

- при R = $R_{min}$ = 160 Ом

$$i(t) = 12{,}5 \cdot 10^{-3}\, e^{-3555{,}6 \cdot t}.$$

Напряжения на катушке индуктивности равно:

$$u_L(t) = L\frac{d}{dt}i(t) = L\frac{d}{dt}[i_{ПР}(t) + i_{СВ}(t)] = L \cdot p \cdot Ae^{pt}, \text{ тогда}$$

- при R = $R_{max}$ = 320 Ом

$$u_L(t) = 45 \cdot 10^{-3} \cdot (-7111{,}1) \cdot 6{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-7111{,}1 \cdot t} = -2 \cdot e^{-7111{,}1 \cdot t} \text{ В};$$

- при R = $R_{min}$ = 160 Ом

$$u_L(t) = 45 \cdot 10^{-3} \cdot (-3555{,}6) \cdot 12{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-3555{,}6 \cdot t} = -2 \cdot e^{-3555{,}6 \cdot t} \text{ В}.$$

## 2.2 Расчет переходного процесса для RC цепи

2.2.1 Расчет переходного процесса при подключении источника
Схема электрической цепи представлена на рисунке 4.

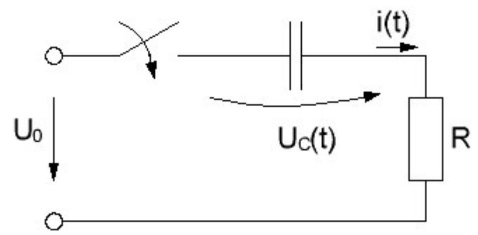



Рисунок 4 – Схема электрической цепи при подключении источника

Расчетное уравнение имеет вид:

$$u_C + u_R = U_0 \Rightarrow \frac{1}{C}\int i(t)dt + i \cdot R = U_0.$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$i(t) = i_{ПР}(t) + i_{СВ}(t).$$

До начало коммутации напряжение на конденсаторе равно:

$$U_C(0-) = 0 \text{В}.$$

Независимые начальные условия равны:

$$U_C(0+) = U_C(0-) = 0 \text{В}.$$

Зависимые начальные условия равны:

$$U_C(0+) + i(0+) \cdot R = U_0,$$

$$i(0+) = [U_0 - U_C(0+)]/R = U_0/R, \text{ тогда}$$

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$i(0+) = 2/5120 = 0{,}391 \cdot 10^{-3} \text{А};$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$i(0+) = 2/2560 = 0{,}781 \cdot 10^{-3} \text{А}.$$

Принужденная составляющая равна:

$$U_{С.ПР}(t) = U_0 = 2 \text{ В}.$$

Расчет характеристического уравнения:

$$\frac{1}{C}\int i_{CB}(t)dt + i_{CB}\cdot R = 0,$$

где $i_{CB}(t) = Ae^{pt}$ – вид свободной составляющей для дифференциального уравнения первого порядка.

$$\int i_{CB}(t)dt = \int Ae^{pt}dt = \frac{1}{p}Ae^{pt} \Rightarrow \frac{1}{Cp}\cdot Ae^{pt} + Ae^{pt}\cdot R = 0,$$

$$\frac{1}{Cp} + R = 0.$$

Корень характеристического уравнения равен:

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$p = 1/(R\cdot C) = 1/(5120\cdot 99{,}1\cdot 10^{-9}) = 1970{,}9\ с^{-1};$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$p = 1/(R\cdot C) = 1/(2560\cdot 99{,}1\cdot 10^{-9}) = 3941{,}7\ с^{-1}.$$

Время переходного процесса равно:

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$\tau = 1/p = 1/1970{,}9 = 0{,}507\cdot 10^{-3}\ с;$$

$$t_{ПП} = 3\tau = 3\cdot 0{,}507\cdot 10^{-3} = 1{,}521\cdot 10^{-3}\ с;$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$\tau = 1/p = 1/3941{,}7 = 0{,}254\cdot 10^{-3}\ с;$$

$$t_{ПП} = 3\tau = 3\cdot 0{,}254\cdot 10^{-3} = 0{,}762\cdot 10^{-3}\ с.$$

Полное решение для напряжения имеет вид:

$$u_C(t) = U_{C.ПР}(t) + U_{C.CB}(t) = U_{C.ПР}(t) + Be^{pt}.$$

Учитывая начальные условия, получим:

$$U_C(0+) = 2 + Be^0 \Rightarrow 0 = 2 + B;$$

$$B = -2.$$

Выражение для напряжения имеет вид:

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$u_C(t) = 2 - 2e^{-1970{,}9\cdot t};$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$u_C(t) = 2 - 2e^{-3941{,}7\cdot t}.$$

Ток в цепи равен:

$$i(t) = C\frac{d}{dt}u_C(t) = C\frac{d}{dt}[i_{ПР}(t) + i_{CB}(t)] = C\cdot p\cdot Be^{pt},\text{ тогда}$$

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$i(t) = 99{,}1\cdot 10^{-9}\cdot(-1970{,}9)\cdot(-2)\cdot e^{-1970{,}9\cdot t} = 0{,}391\cdot 10^{-3}\cdot e^{-1970{,}9\cdot t}\ А;$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$i(t) = 99{,}1\cdot 10^{-9}\cdot(-3941{,}7)\cdot(-2)\cdot e^{-3941{,}7\cdot t} = 0{,}781\cdot 10^{-3}\cdot e^{-3941{,}7\cdot t}\ А.$$

2.2.2 Расчет переходного процесса при отключении от источника

Схема электрической цепи представлена на рисунке 5.

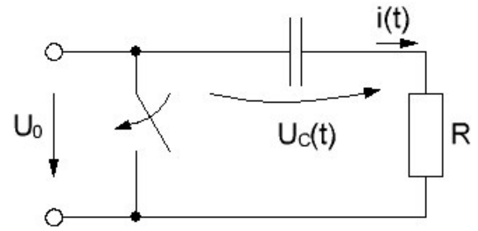



Рисунок 5 – Схема электрической цепи при отключении от источника

Расчетное уравнение имеет вид:

$$u_C + u_R = 0 \Rightarrow \frac{1}{C}\int i(t)dt + i \cdot R = 0.$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$i(t) = i_{ПР}(t) + i_{СВ}(t).$$

До начало коммутации напряжение на конденсаторе равно:

$$U_C(0-) = U_0 = 2\text{В}.$$

Независимые начальные условия равны:

$$U_C(0+) = U_C(0-) = 2\,\text{В}.$$

Зависимые начальные условия равны:

$$U_C(0+) + i(0+) \cdot R = 0 \Rightarrow i(0+) = -U_C(0+)/R \text{ тогда}$$

- при $R = R_{max}$ = 5120 Ом

$$i(0+) = -2/5120 = -0{,}391 \cdot 10^{-3}\text{А};$$

- при $R = R_{min}$ = 2560 Ом

$$i(0+) = -2/2560 = -0{,}781 \cdot 10^{-3}\text{А}.$$

Принужденная составляющая равна:

$$U_{С.ПР}(t) = U_0 = 0\text{В}.$$

Расчет характеристического уравнения:

$$\frac{1}{C}\int i_{СВ}(t)dt + i_{СВ} \cdot R = 0,$$

где $i_{СВ}(t) = Ae^{pt}$ – вид свободной составляющей для дифференциального уравнения первого порядка.

$$\int i_{СВ}(t)dt = \int Ae^{pt}dt = \frac{1}{p}Ae^{pt} \Rightarrow \frac{1}{Cp} \cdot Ae^{pt} + Ae^{pt} \cdot R = 0,$$

$$\frac{1}{Cp} + R = 0.$$

Корень характеристического уравнения равен:

- при $R = R_{max}$ = 5120 Ом

$$p = 1/(R \cdot C) = 1/(5120 \cdot 99{,}1 \cdot 10^{-9}) = 1970{,}9\text{с}^{-1};$$

- при $R = R_{min}$ = 2560 Ом

$$p = 1/(R \cdot C) = 1/(2560 \cdot 99{,}1 \cdot 10^{-9}) = 3941{,}7\ \text{с}^{-1}.$$

Время переходного процесса равно:

- при $R = R_{max}$ = 5120 Ом

$$\tau = 1/p = 1/1970{,}9 = 0{,}507 \cdot 10^{-3}\ \text{с};$$

$$t_{ПП} = 3\tau = 3 \cdot 0{,}507 \cdot 10^{-3} = 1{,}521 \cdot 10^{-3}\ с;$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$\tau = 1/p = 1/3941{,}7 = 0{,}254 \cdot 10^{-3}\ с;$$

$$t_{ПП} = 3\tau = 3 \cdot 0{,}254 \cdot 10^{-3} = 0{,}762 \cdot 10^{-3}\ с.$$

Полное решение для напряжения имеет вид:

$$u_C(t) = U_{C.ПР}(t) + U_{C.СВ}(t) = U_{C.ПР}(t) + Be^{pt}.$$

Учитывая начальные условия, получим:

$$U_C(0+) = 0 + Be^0 \Rightarrow 2 = 0 + B;$$

$$B = 2.$$

Выражение для напряжения имеет вид:

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$u_C(t) = 2e^{-1970{,}9 \cdot t};$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$u_C(t) = 2e^{-3941{,}7 \cdot t}.$$

Ток в цепи равен:

$$i(t) = C\frac{d}{dt}u_C(t) = C\frac{d}{dt}[i_{ПР}(t) + i_{СВ}(t)] = C \cdot p \cdot Be^{pt},\ тогда$$

- при R = $R_{max}$ = 5120 Ом

$$i(t) = 99{,}1 \cdot 10^{-9} \cdot (-1970{,}9) \cdot 2 \cdot e^{-1970{,}9 \cdot t} = -0{,}391 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-1970{,}9 \cdot t}\ А;$$

- при R = $R_{min}$ = 2560 Ом

$$i(t) = 99{,}1 \cdot 10^{-9} \cdot (-3941{,}7) \cdot 2 \cdot e^{-3941{,}7 \cdot t} = -0{,}781 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-3941{,}7 \cdot t}\ А.$$

## 3 Задание на эксперимент

Собрать цепь рисунка 6. Параметры $R_Ш$, $R_М$, L напряжение $U_0$ и частоту f генератора выбрать согласно предварительному расчету. Зарисовать изображения для двух значений $R_М$. Снять закаротку с верхнего резистора $R_Ш$,закоротить нижний. Вход 2 ЭК подключить к точке B, см. рисунок 6. При этом в нижней части экрана осциллографа появится кривая напряжения на катушке индуктивности. Зарисовать изображение для дву значений $R_М$.

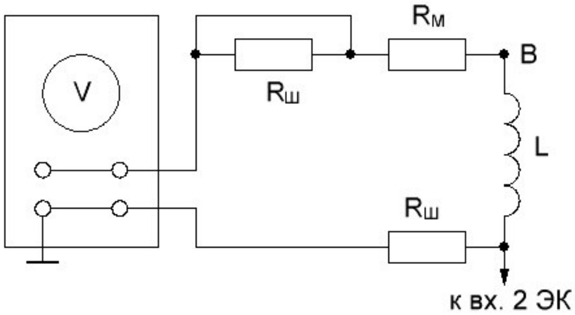



Рисунок 6 – Схема эксперимента для RL цепи

Зарисовать с экрана осциллографа фазовый портрет $i`_L(i_L)$ переохдного процесса в цепи R, L, см. рисунок 7. Для этого переключатель рода работы горизонтального усиления (вход X) перевести в положение «Внеш.».

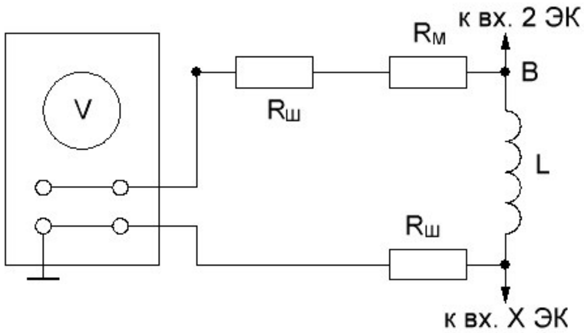



Рисунок 7 – Схема для снятия фазового портрета RL цепи

Заменив индуктивность L на емкость C, выполнить аналогично эксперимент согласно рисунка 8.

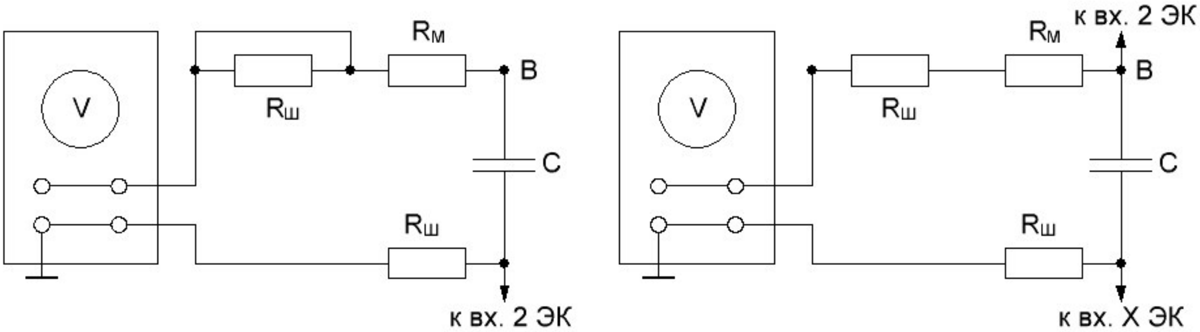
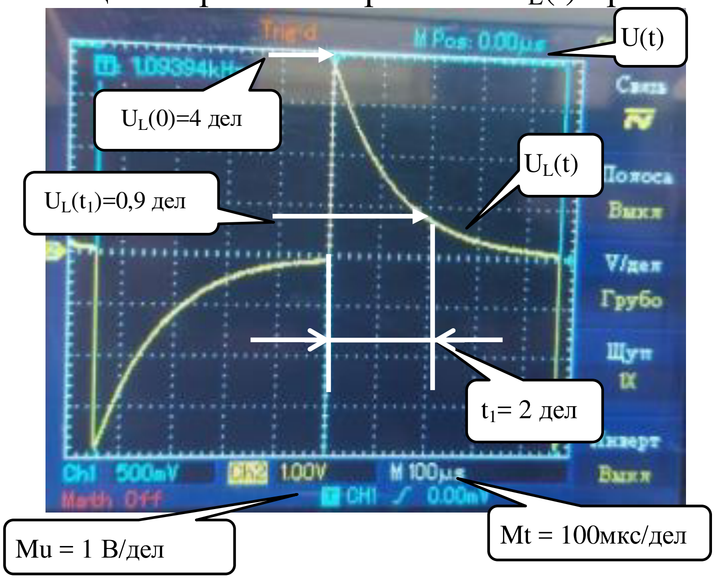



Рисунок 8 – Схема эксперимента для RC цепи

## 4 Обработка результатов эксперимента

### 4.1 Осциллограммы напряжений RL цепи при R = 320 Ом

Осциллограмма напряжения $u_L(t)$ при R = 320 Ом




$t_1$ = 2 дел·100 мкс/дел = 200 мкс,

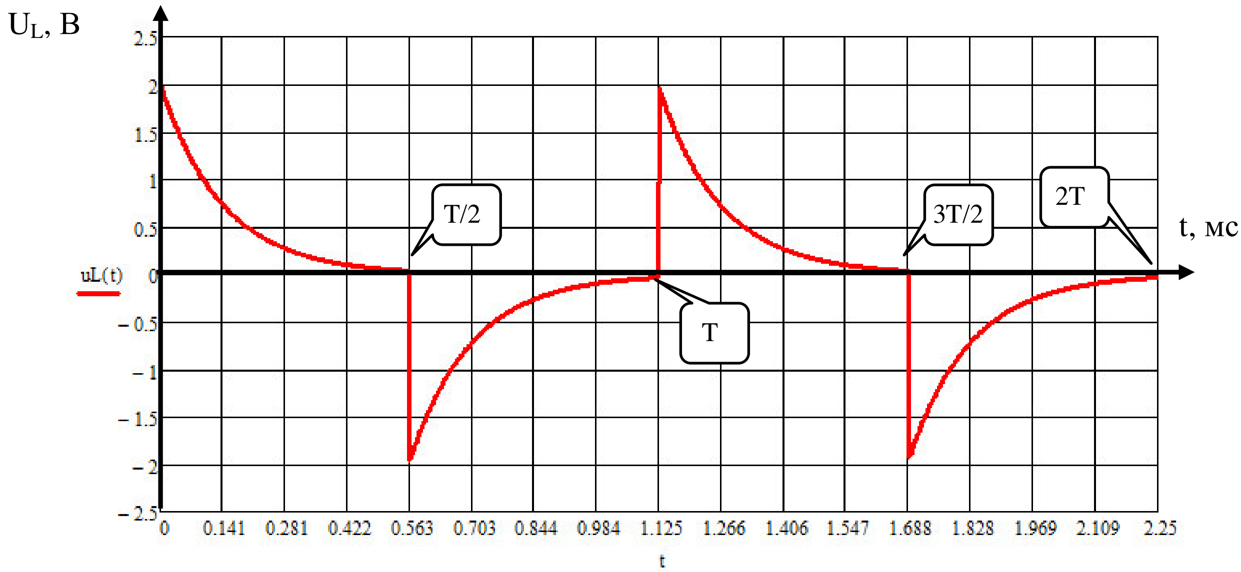
$U_L(0)$ = 4 дел·1 В/дел = 4 В,

$U_L(t_1)$ = 0,9 дел·1 В/дел= 0,9 В,

$$\tau_Э = \frac{t_1 - t_0}{\ln[u_L(0)/u_L(t_1)]}$$

$$\tau_Э = \frac{200\cdot 10^{-6} - 0}{\ln[4/0{,}9]} = 0{,}134 \text{ мс},$$

$\tau_P$ = 0,141 мс.




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$U_L(t) = U_0 \cdot e^{-R/L\cdot t},$$

где $U_L(0) = U_0$ = 2 В, $U_L(T/2)$ = 0,037 В.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$U_L(t) = U_0 \cdot [e^{-R/L\cdot t} - e^{-R/L\cdot(t-T/2)}],$$

где $U_L(T/2)$ = –1,963 В, $U_L(T)$ = –0,037 В.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$U_L(t) = U_0 \cdot [e^{-R/L\cdot t} - e^{-R/L\cdot(t-T/2)} + e^{-R/L\cdot(t-T)}],$$

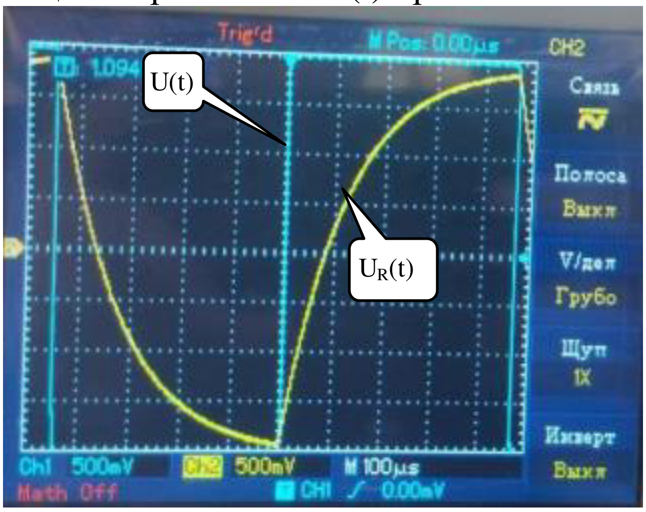
где $U_L(T)$ = 1,963 В, $U_L(3T/2)$ = 0,037 В.

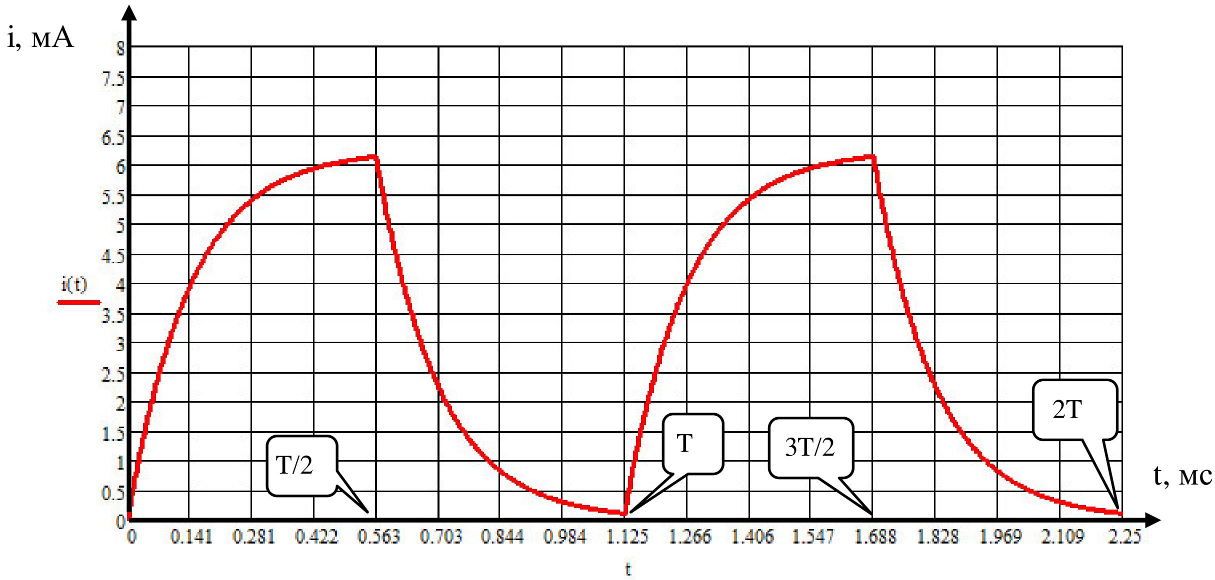
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$U_L(t) = U_0 \cdot [e^{-R/L\cdot t} - e^{-R/L\cdot(t-T/2)} + e^{-R/L\cdot(t-T)} - e^{-R/L\cdot(t-3T/2)}],$$

где $U_L(3T/2)$ = –1,963 В, $U_L(2T/)$ = –0,037 В.

Осциллограмма тока i(t) при R = 320 Ом




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$i(t) = U_0 / R \cdot (1 - e^{-R/L \cdot t}),$$

где i(0) = 0 А, i(T/2) = 6,14 мА.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-R/L \cdot (t - T/2)} - e^{-R/L \cdot t}],$$

где i(T/2) = 6,14 мА, i(T) = 0,11 мА.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [1 + e^{-R/L \cdot (t - T/2)} - e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t - T)}],$$

где i(T) = 0,11 А, i(3T/2) = $U_0$/R = 6,14 мА.

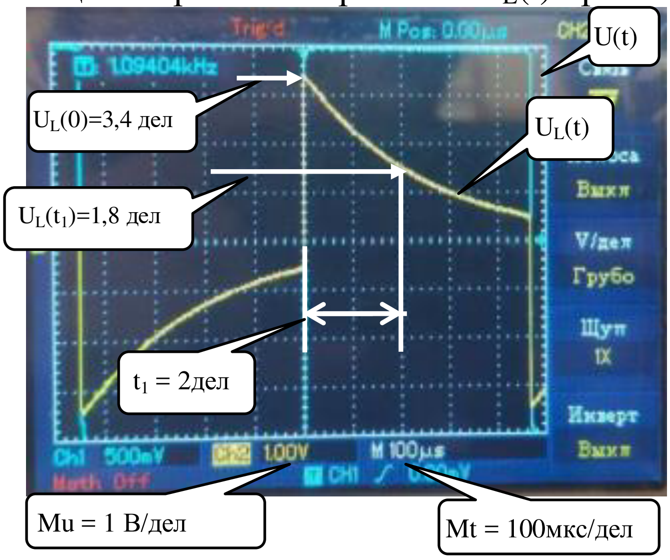
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-R/L \cdot (t - T/2)} - e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t - T)} + e^{-R/L \cdot (t - 3T/2)}],$$

где i(3T/2) = 6,14 мА, i(2T) = 0,11 мА.

### 4.2 Осциллограммы напряжений RL цепи при R = 160 Ом

Осциллограмма напряжения $u_L(t)$ при R = 160 Ом




$t_1$ =2 дел·100 мкс/дел = 200 мкс,

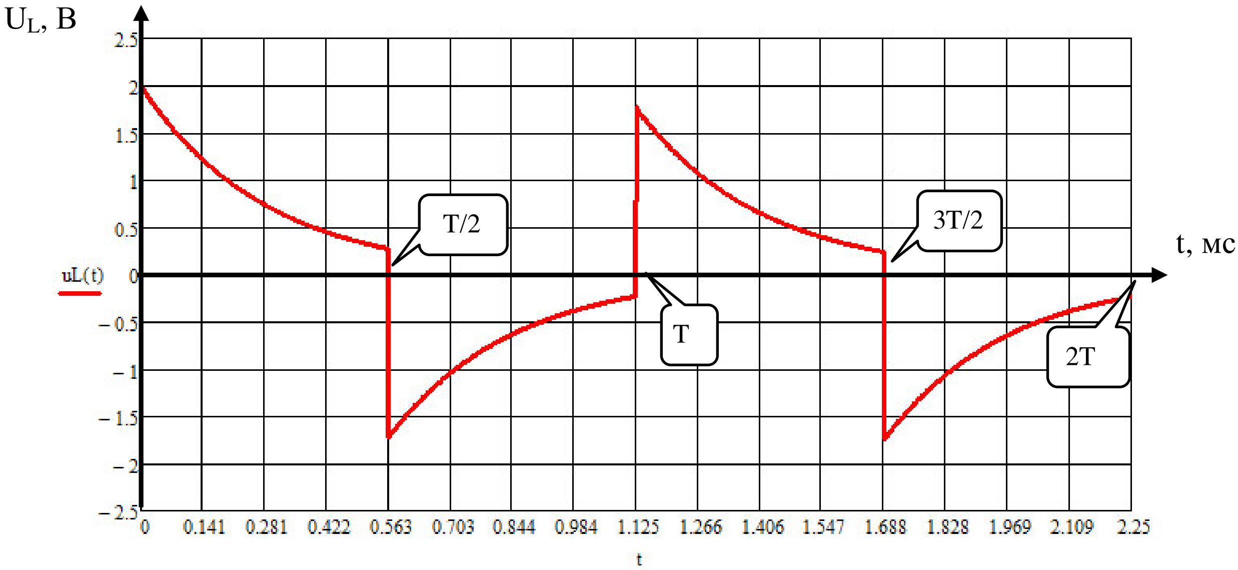
$U_L(0)$ = 3,4 дел·1 В/дел = 3,4 В,

$U_L(t_1)$ = 1,6 дел·1 В/дел = 1,6 В,

$$\tau_Э = \frac{t_1 - t_0}{\ln[u_L(0)/u_L(t_1)]}$$

$$\tau_Э = \frac{200 \cdot 10^{-6} - 0}{\ln[3{,}4/1{,}6]} = 0{,}265 \text{ мс},$$

$\tau_P$ = 0,281 мс.




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$U_L(t) = U_0 \cdot e^{-R/L \cdot t},$$

где $U_L(0) = U_0$ = 2 В, $U_L(T/2)$ = 0,27 В.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$U_L(t) = U_0 \cdot [e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t-T/2)}],$$

где $U_L(T/2)$ = –1,73 В, $U_L(T)$ = –0,27 В.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$U_L(t) = U_0 \cdot [e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t-T/2)} + e^{-R/L \cdot (t-T)}],$$

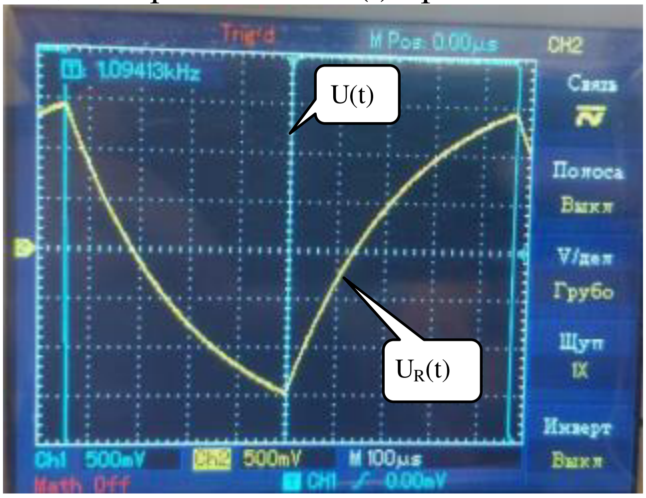
где $U_L(T)$ = 1,73 В, $U_L(3T/2)$ = 0,271 В.

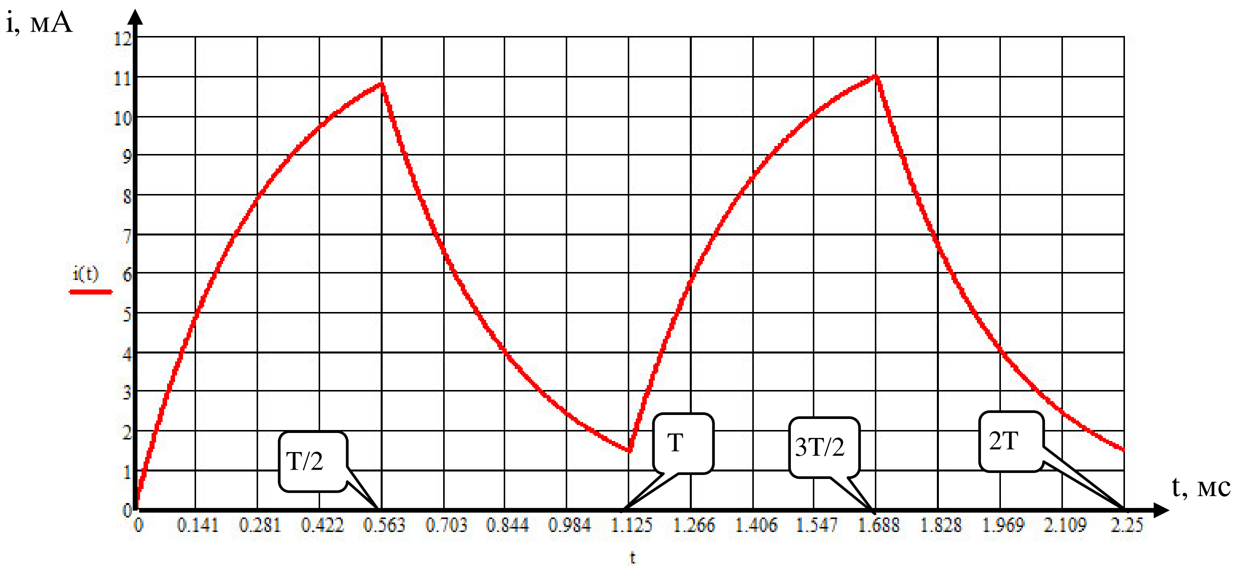
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$U_L(t) = U_0 \cdot [e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t-T/2)} + e^{-R/L \cdot (t-T)} - e^{-R/L \cdot (t-3T/2)}],$$

где $U_L(3T/2)$ = –1,73 В, $U_L(2T/)$ = –0,27 В.

Осциллограммы тока i(t) при R = 160 Ом




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$i(t) = U_0 / R \cdot (1 - e^{-R/L \cdot t}),$$

где i(0) = 0 А, i(T/2) = 10,8 мА.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-R/L \cdot (t - T/2)} - e^{-R/L \cdot t}],$$

где i(T/2) = 10,8 мА, i(T) = 1,5 мА.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [1 + e^{-R/L \cdot (t - T/2)} - e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t - T)}],$$

где i(T) = 1,5 А, i(3T/2) = $U_0$/R = 10,8 мА.

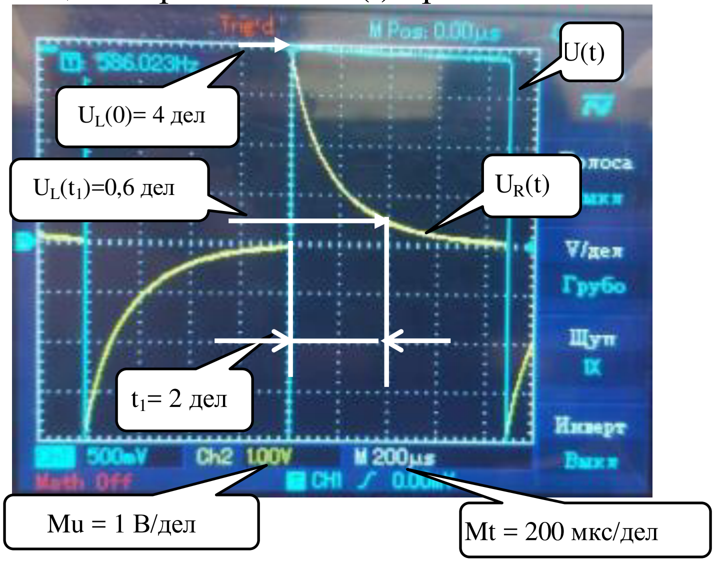
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-R/L \cdot (t - T/2)} - e^{-R/L \cdot t} - e^{-R/L \cdot (t - T)} + e^{-R/L \cdot (t - 3T/2)}],$$

где i(3T/2) = 10,8 мА, i(2T) = 1,5 мА.

## 4.3 Осциллограммы напряжений RC цепи при R = 5120 Ом

Осциллограмма тока i(t) при R = 5120 Ом




$t_1$ =2 дел·200 мкс/дел = 400 мкс,

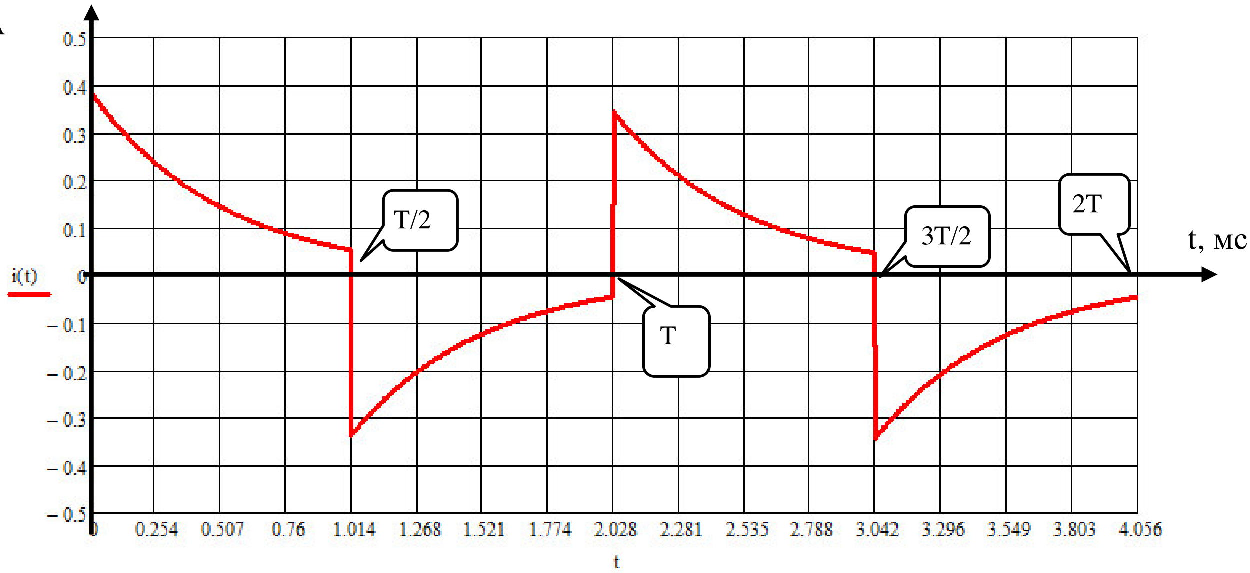
i(0) = 4 дел·1 В/дел = 4 В,

$i(t_1)$ = 0,6 дел·1 В/дел = 0,6 В,

$$\tau_Э = \frac{t_1 - t_0}{\ln[i(0)/i(t_1)]}$$

$$\tau_Э = \frac{400 \cdot 10^{-6} - 0}{\ln[4/0{,}6]} = 0{,}510 \text{ мс},$$

$\tau_Р$ = 0,507 мс.




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$i(t) = U_0 / R \cdot e^{-1/RC \cdot t},$$

где i(0) = $U_0$ /R= 0,391 мА, i(T/2) = 0,053 мА.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-1/Rc \cdot t} - e^{-1/Rc \cdot (t-T/2)}],$$

где i(T/2) = –0,34 мА, i(T) = –0,053 мА.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-1/RC \cdot t} - e^{-1/RC \cdot (t-T/2)} + e^{-1/RC \cdot (t-T)}],$$

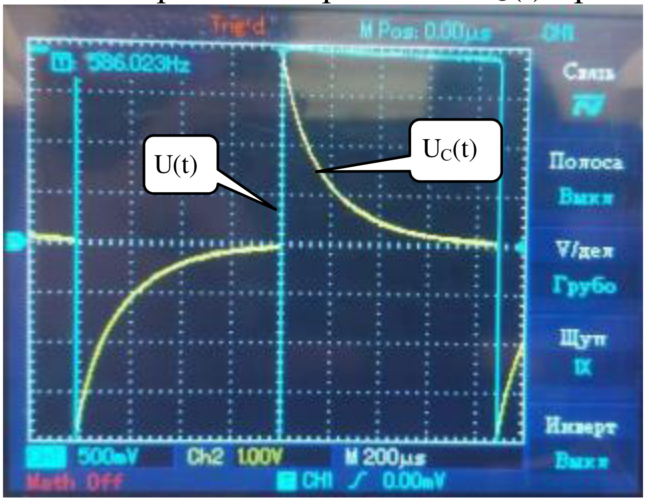
где i(T) = 0,34 мА, i(3T/2) = 0,053 мА.

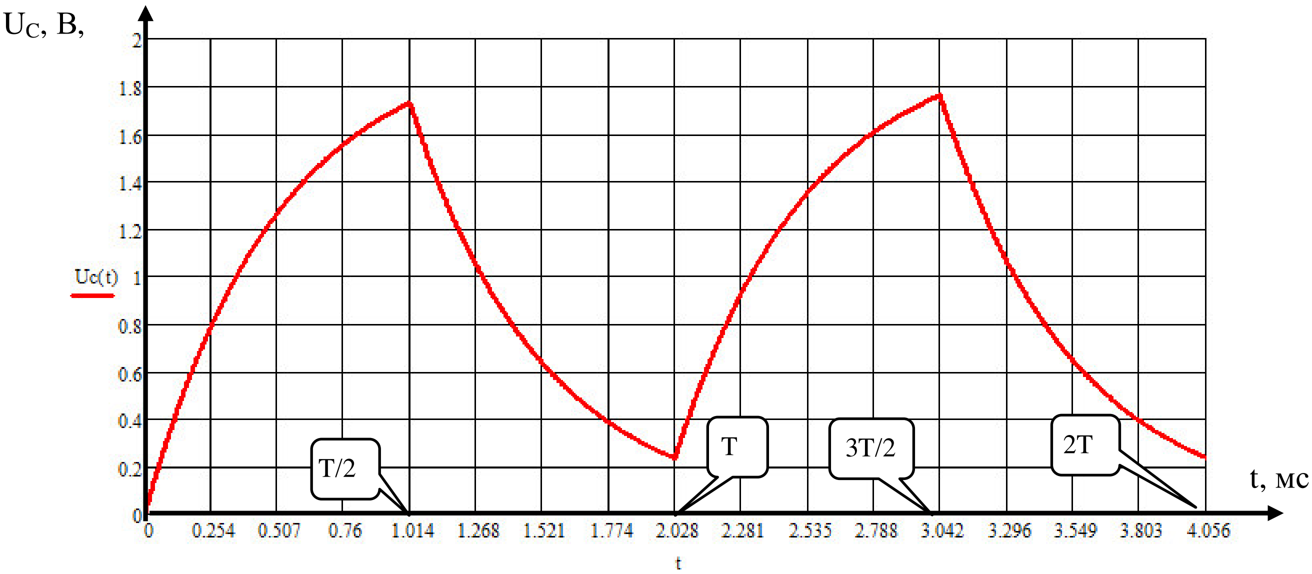
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$i(t) = U_0 / R \cdot [e^{-1/RC \cdot t} - e^{-1/RC \cdot (t-T/2)} + e^{-1/RC \cdot (t-T)} - e^{-1/RC \cdot (t-3T/2)}],$$

где i(3T/2) = –0,34 мА, i(2T/) = –0,053 мА.

Осциллограмма напряжения $U_C(t)$ при R = 5120 Ом




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$U_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-1/RC \cdot t}),$$

где $U_C(0)$ = 0 В, $U_C(T/2)$ = 1,73 В.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$U_C(t) = U_0 \cdot [e^{-1/RC \cdot (t - T/2)} - e^{-1/RC \cdot t}],$$

где $U_C(T/2)$ =1,73 В, $U_C(T)$ = 0,23 В.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$U_C(t) = U_0 \cdot [1 + e^{-1/RC \cdot (t - T/2)} - e^{-1/RC \cdot t} - e^{-1/RC \cdot (t - T)}],$$

где $U_C(T)$ = 0,23 В, $U_C(3T/2) = U_0/R$ = 1,73 В.

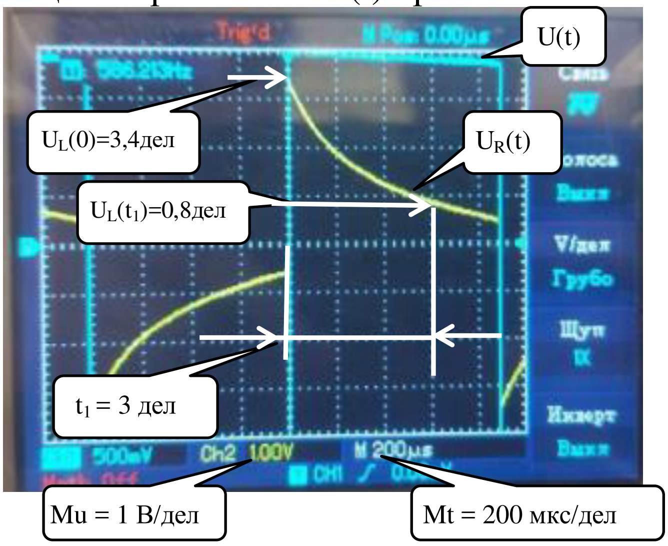
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$U_C(t) = U_0 \cdot [e^{-1/RC \cdot (t - T/2)} - e^{-1/RC \cdot t} - e^{-1/RC \cdot (t - T)} + e^{-1/RC \cdot (t - 3T/2)}],$$

где $U_C(3T/2)$ = 1,73 В, $U_C(2T)$ = 0,23 В.

### 4.4 Осциллограммы напряжений RC цепи при R = 2560 Ом

Осциллограмма тока i(t) при R = 2560 Ом




$t_1$ = 3 дел·200 мкс/дел = 600 мкс,

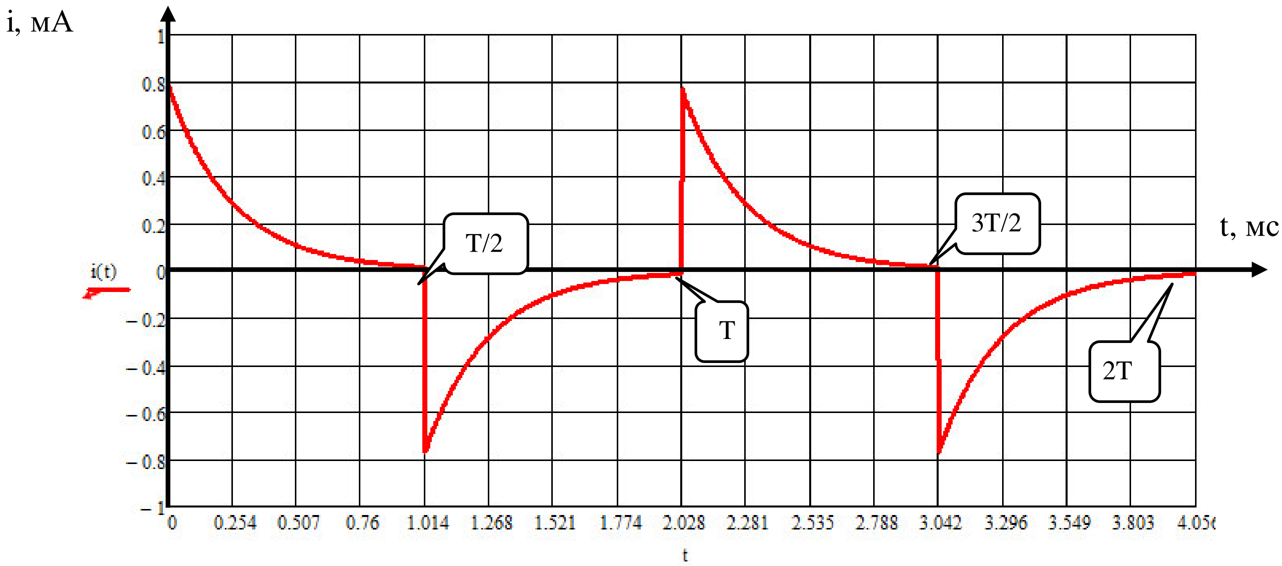
i(0) = 3,4 дел·1 В/дел = 3,4 В,

$i(t_1)$ = 0,8 дел·1 В/дел = 0,8 В,

$$\tau_Э = \frac{t_1 - t_0}{\ln[i(0)/i(t_1)]}$$

$$\tau_Э = \frac{600\cdot 10^{-6} - 0}{\ln[3{,}4/0{,}8]} = 0{,}314 \text{ мс},$$

$\tau_Р$ = 0,254 мс.




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$i(t) = U_0/R \cdot e^{-1/RC\cdot t},$$

где i(0) = $U_0$ /R= 0,781 мА, i(T/2) = 0,014 мА.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$i(t) = U_0/R\cdot[e^{-1/Rc\cdot t} - e^{-1/Rc\cdot(t-T/2)}],$$

где i(T/2) = –0,77 мА, i(T) = –0,014 мА.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$i(t) = U_0/R\cdot[e^{-1/RC\cdot t} - e^{-1/RC\cdot(t-T/2)} + e^{-1/RC\cdot(t-T)}],$$

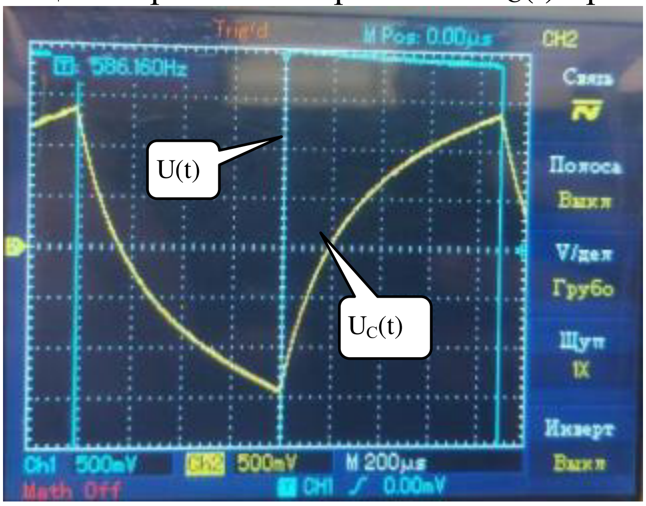
где i(T) = 0,77 мА, i(3T/2) = 0,014 мА.

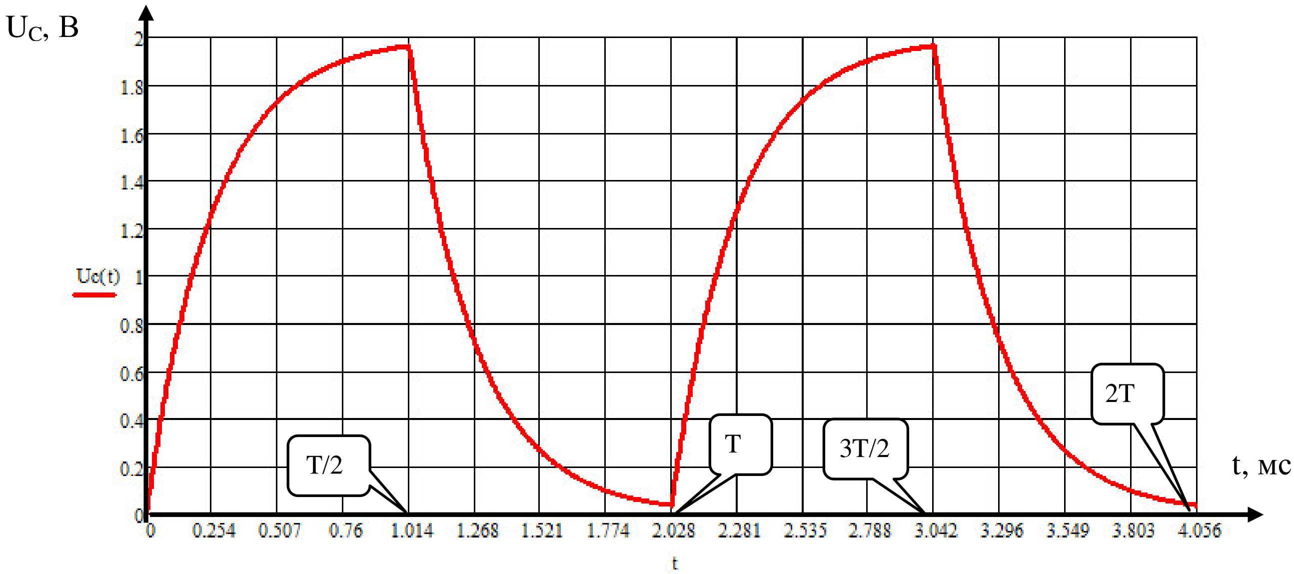
Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$i(t) = U_0/R\cdot[e^{-1/RC\cdot t} - e^{-1/RC\cdot(t-T/2)} + e^{-1/RC\cdot(t-T)} - e^{-1/RC\cdot(t-3T/2)}],$$

где i(3T/2) = –0,77 мА, i(2T/) = –0,014 мА.

Осциллограммап напряжения $U_C(t)$ при R = 2560 Ом




Интервал $0 \le t \le T/2$

$$U_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-1/RC \cdot t}),$$

где $U_C(0)$ = 0 В, $U_C(T/2)$ = 1,96 В.

Интервал $T/2 \le t \le T$

$$U_C(t) = U_0 \cdot [e^{-1/RC\cdot(t-T/2)} - e^{-1/RC\cdot t}],$$

где $U_C(T/2)$ = 1,96 В, $U_C(T)$ = 0,035 В.

Интервал $T \le t \le 3T/2$

$$U_C(t) = U_0 \cdot [1 + e^{-1/RC\cdot(t-T/2)} - e^{-1/RC\cdot t} - e^{-1/RC\cdot(t-T)}],$$

где $U_C(T)$ = 0,035 В, $U_C(3T/2) = U_0/R$ = 1,96 В.

Интервал $3T/2 \le t \le 2T$

$$U_C(t) = U_0 \cdot [e^{-1/RC\cdot(t-T/2)} - e^{-1/RC\cdot t} - e^{-1/RC\cdot(t-T)} + e^{-1/RC\cdot(t-3T/2)}],$$

где $U_C(3T/2)$ = 1,96 В, $U_C(2T)$ = 0,035 В.