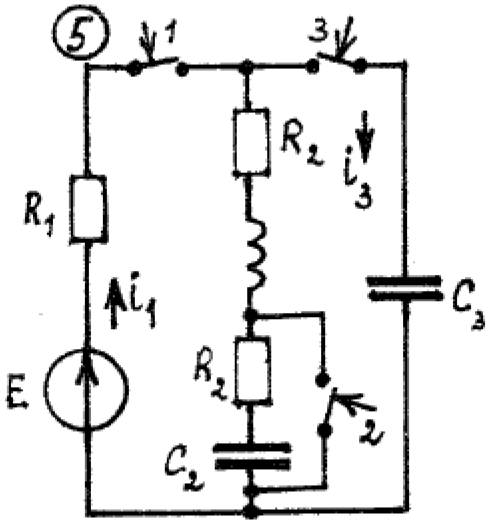
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ НЕСКОЛЬКИХ КОММУТАЦИЯХ

$$n = 5$$
$$N_{пом} = 1$$
$$N_{гр} = 212$$



Дано:

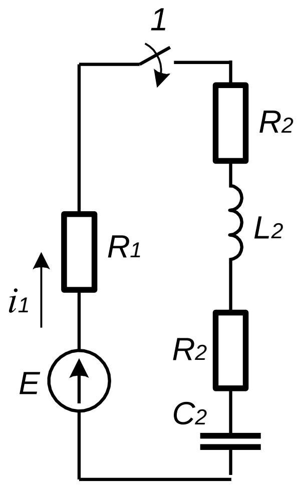
$$E = 20 + 10 \cdot N_{пом} + 10 \cdot N_{гр} + 5 \cdot n =$$
$$= 20 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot 212 + 5 \cdot 5 = 2175 \;\; В$$

$$R_1 = 10 + 2 \cdot n = 10 + 2 \cdot 5 = 20 \;\; Ом$$
$$R_2 = 20 + 2 \cdot n = 20 + 2 \cdot 5 = 30 \;\; Ом$$
$$R_3 = 30 + 2 \cdot n = 30 + 2 \cdot 5 = 40 \;\; Ом$$
$$L_1 = L_3 = 0{,}05 + 0{,}005 \cdot n = 0{,}05 + 0{,}005 \cdot 5 = 0{,}075 \;\; Гн$$
$$L_2 = 0{,}02 \cdot N_{гр} + 0{,}004 \cdot n = 0{,}02 \cdot 212 + 0{,}004 \cdot 5 = 4{,}26 \;\; Гн$$
$$C_1 = C_3 = 20 + 10 \cdot N_{пом} + 10 \cdot n = 20 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot 5 = 80 \;\; мкФ$$
$$C_2 = 20 + 5 \cdot N_{пом} + 10 \cdot N_{гр} + 10 \cdot n = 20 + 5 \cdot 1 + 10 \cdot 212 + 10 \cdot 5 = 2195 \;\; мкФ$$

Решение:

ЧАСТЬ I. Рассчитаем показанные на исходной схеме токи $i_1(t)$, $i_3(t)$ и напряжение на емкости $u_C(t)$ классическим методом после каждой коммутации.

1-я коммутация:



Расчет режима до коммутации (при $t = 0_-$)

$$i_1(0_-) = 0$$
$$u_{C2}(0_-) = 0$$

по независимым начальным условиям:

$$i_1(0_+) = i_1(0_-) = 0$$
$$u_{C2}(0_+) = u_{C2}(0_-) = 0$$

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни

$$Z(p) = R_1 + R_2 + L_2 p + R_2 + \frac{1}{C_2 p} = \frac{\left(R_1 + 2R_2\right)C_2 p + L_2 C_2 p^2 + 1}{C_2 p} = 0$$

$$\Rightarrow L_2 C_2 p^2 + \left(R_1 + 2R_2\right)C_2 p + 1 = 0$$

$$4,26 \cdot 2195 \times 10^{-6} p^2 + \left(20 + 2 \cdot 30\right) \cdot 2195 \times 10^{-6} p + 1 = 0$$

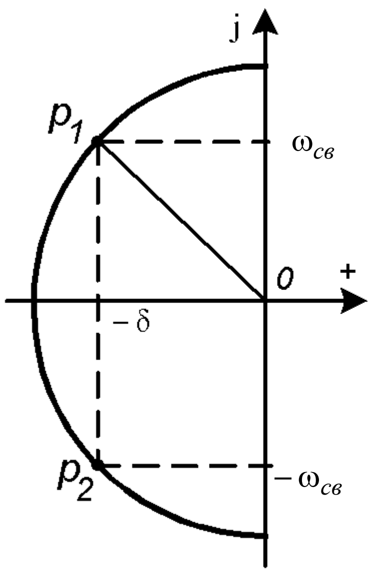
$$0,0093507 p^2 + 0,1756 p + 1 = 0$$

$$p_{1,2} = \frac{-0,1756 \pm \sqrt{0,1756^2 - 4 \cdot 0,0093507 \cdot 1}}{2 \cdot 0,0093507}$$

$$p_1 \approx \left(-9,3897 + j4,3333\right) \ c^{-1};$$

$$p_2 \approx \left(-9,3897 - j4,3333\right) \ c^{-1};$$

Поскольку корни комплексные и сопряженные, то переходный процесс будет колебательный.



Здесь

$$\delta = 9,3897 \ c^{-1}$$

$$\omega_{\text{св}} = 4,3333 \ \frac{рад}{c}$$

Запишем свободную составляющую напряжения на емкости

$$u_{C2св}(t) = A_1 \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \nu_1)$$

,где $\omega_{св}$ - угловая частота свободных колебаний;

δ - коэффициент затухания;

ν - начальная фаза

Расчет установившегося режима после коммутации.

$$i_{1пр} = 0$$

$$u_{C2\ пр} = E = 2175 \ B$$

Свободные составляющие токов и напряжений при $t=0_+$ найдем как разницу между переходными и принужденными величинами.

$$i_{1св}(0_+)=i_1(0_+)-i_{1пр}=0-0=0$$

$$u_{C2\ св}(0_+)=u_{C2}(0_+)-u_{C\ пр}=0-2175=-2175\ \ B$$

$$i_{1св}(0_+)=C_2\frac{du_{C2\ св}(0_+)}{dt}\ \Rightarrow\ \frac{du_{C2\ св}(0_+)}{dt}=\frac{i_{1св}(0_+)}{C_2}=\frac{0}{2195\times10^{-6}}=0$$

Определим постоянные интегрирования по начальным условиям

$$\begin{cases}u_{C2св}(t)=A_1\cdot e^{-\delta t}\sin(\omega_{св}t+\nu_1)\\ \dfrac{u_{C2св}(t)}{dt}=-A_1\cdot\delta\cdot e^{-\delta t}\sin(\omega_{св}t+\nu_1)+A_1\cdot\omega_{св}\cdot e^{-\delta t}\cos(\omega_{св}t+\nu_1)\end{cases}$$

Подставим в эти уравнения $t=0_+$

$$\begin{cases}u_{C2св}(0)=A_1\cdot\sin\nu_1\\ \dfrac{u_{C2св}(0)}{dt}=-A_1\cdot\delta\cdot\sin\nu_1+A_1\cdot\omega_{св}\cdot\cos\nu_1\end{cases}$$

$$\begin{cases}-2175=A_1\cdot\sin\nu_1\\ 0=-A_1\cdot\delta\cdot\sin\nu_1+A_1\cdot\omega_{св}\cdot\cos\nu_1\end{cases}$$

Из второго уравнения

$$A_1\cos\nu_1=\frac{A_1\cdot\delta\cdot\sin\nu_1}{\omega_{св}}=\frac{-2175\cdot9,3897}{4,3333}\approx-4712,94\ \ B$$

$$\Rightarrow tg\ \ \nu_1=\frac{\sin\nu_1}{\cos\nu_1}=\frac{A_1\sin\nu_1}{A_1\cos\nu_1}=\frac{-2175}{-4712,94}\approx0,4615$$

тогда $\nu_1=arctg(0,4615)\approx24,773^\circ$

$$A_1=\frac{-2175}{\sin\ \ \nu_1}=\frac{-2175}{\sin(24,773^\circ)}\approx-5190,6\ \ B$$

Искомое напряжение найдем как сумму его принужденной и свободной составляющих

$$u_C(t)=u_{C2пр}+u_{Cсв}(t)=u_{Cпр}+A_1\cdot e^{-\delta t}\sin(\omega_{св}t+\nu_1)=$$
$$=2175-5190,6\cdot e^{-9,3897\cdot t}\sin(4,3333\cdot t+24,773^\circ),B$$

ток i$_1$(t) найдем как:

$$i_1(t)=C_2\frac{du_{C2}(t)}{dt}=2195\times10^{-6}\cdot\left(2175-5190,6\cdot e^{-9,3897\cdot t}\sin(4,3333\cdot t+24,773^\circ)\right)'\approx$$
$$\approx106,98e^{-9,3897\cdot t}\sin(4,3333\cdot t+24,773^\circ)-49,37e^{-9,3897\cdot t}\cos(4,3333\cdot t+24,773^\circ),\text{А}$$

для проверки подставим в это уравнение $t=0_+$ **,** получим $i_1(0_+)\approx0$, что совпадает с расчетом проведенным выше.

<u>2-я коммутация:</u>

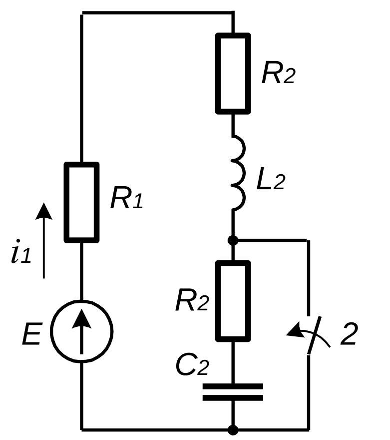
Вторая коммутация происходит через интервал времени t_1 после первой коммутации.

Для схемы с двумя накопителями при возникновении колебательного процесса

$$t_1 = \frac{T_{св}}{4} = \frac{0{,}1065}{4} \approx 0{,}026625 \text{ с},$$

$$T_{св} = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{9{,}3897} \approx 0{,}1065 \ \ c$$

где Тсв – период свободных колебаний.



При расчете 2-й коммутации в цепи момент времени t_1 примем за начало отсчета ($t=0$)

Расчет режима до коммутации (при $t = 0_-$)

$$i_1(0_-) = 106{,}98e^{-9{,}3897\cdot t_1}\sin(4{,}3333\cdot t_1 + 24{,}773^\circ) - 49{,}37e^{-9{,}3897\cdot t_1}\cos(4{,}3333\cdot t_1 + 24{,}773^\circ) \approx 10{,}56 \ \ A$$

$$u_{C2}(0_-) = 2175 - 5190{,}6\cdot e^{-9{,}3897\cdot t_1}\sin(4{,}3333\cdot t_1 + 24{,}773^\circ) \approx 69{,}85 \ \ B$$

по независимым начальным условиям:

$$i_1(0_+) = i_1(0_-) = 10{,}56 \ \ A$$

$$u_{C2}(0_+) = u_{C2}(0_-) = 69{,}85 \ \ B$$

<u>Расчет напряжения $u_{C2}(t)$:</u>

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни

$$Z(p_c) = R_2 + \frac{1}{C_2 p} = \frac{R_2 C_2 p_c + 1}{C_2 p_c} = 0$$

$$\Rightarrow p_c = \frac{-1}{R_2 C_2} = \frac{-1}{30\cdot 2195\times 10^{-6}} = -15{,}186 \ \ c^{-1}$$

Т.к. получили один действительный отрицательный корень, то переходный процесс будет апериодическим.

Запишем свободную составляющую напряжения u_{C2}

$$u_{C2св}(t) = A_4 \cdot e^{p_c\cdot t}$$

, где A_4 – постоянная интегрирования;

Расчет установившегося режима после коммутации.

$$u_{C2пр} = 0$$

Свободную составляющую при $t = 0_+$ найдем как разницу между переходной и принужденной величинами.

$$u_{C2\ св}(0_+) = u_{C2}(0_+) - u_{C\ пр} = 69{,}85 - 0 = 69{,}85 \ \ B$$

Определим постоянные интегрирования по начальным условиям

$$u_{C2св}(t) = A_4 \cdot e^{p_c \cdot t}$$

Подставим в это уравнение $t = 0_+$

$$u_{C2св}(0_+) = A_4 \cdot e^{p_c \cdot 0_+} = A_4$$
$$\Rightarrow A_4 = u_{C2св}(0_+) = 69,85 \;\; B$$

Ток i₁(t) найдем как сумму его принужденной и свободной составляющих

$$u_{C2}(t) = u_{C2пр} + u_{C2св}(t) = u_{C2пр} + A_4 \cdot e^{p_c \cdot t} = 0 + 69,85e^{-15,186 \cdot t} = 69,85e^{-15,186 \cdot t}, B$$

<u>Расчет тока i_1(t):</u>

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни

$$Z(p) = R_1 + R_2 + L_2 p = 0$$
$$\Rightarrow p = \frac{-R_1 - R_2}{L_2} = \frac{-20-30}{4,26} \approx -11,7371 \;\; c^{-1}$$

Т.к. получили один действительный отрицательный корень, то переходный процесс будет апериодическим.

Запишем свободную составляющую тока $i_{1св}$

$$i_{1св}(t) = A_3 \cdot e^{p \cdot t}$$

, где A_3 – постоянная интегрирования;

Расчет установившегося режима после коммутации

$$i_{1пр} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{2175}{20+30} = 43,5 \;\; A$$

Свободную составляющую при $t = 0_+$ найдем как разницу между переходной и принужденной величинами.

$$i_{1св}(0_+) = i_1(0_+) - i_{1пр} = 10,56 - 43,5 = -32,94 \;\; A$$

Определим постоянные интегрирования по начальным условиям

$$i_{1св}(t) = A_3 \cdot e^{p \cdot t}$$

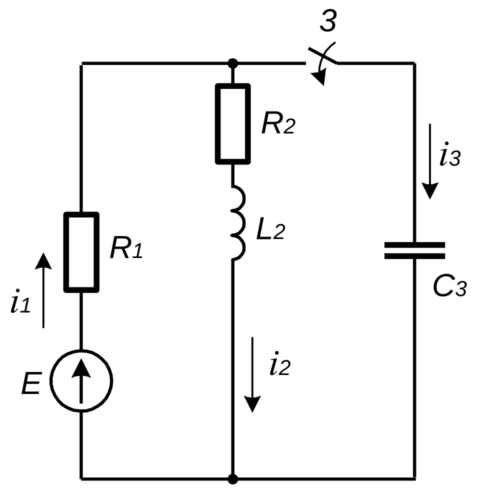
Подставим в это уравнение $t = 0_+$

$$i_{1св}(0_+) = A_3 \cdot e^{p \cdot 0_+} = A_3$$
$$\Rightarrow A_3 = i_{1св}(0_+) = -32,94 \;\; A$$

Ток i_1(t) найдем как сумму его принужденной и свободной составляющих

$$i_1(t) = i_{1пр} + i_{1св}(t) = i_{1пр} + A_3 \cdot e^{p \cdot t} = 43,5 - 32,94e^{-11,7371 \cdot t}, A$$

3-я коммутация:



3-я коммутация происходит через интервал времени t_2 после 2-й коммутации.

Для схемы с одним накопителем после 2-й коммутации:

$$t_2 = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{-11,7371} \approx 0,0852 \ \ c$$

, где p – корень характеристического уравнения

При расчете 3-й коммутации в цепи момент времени t_2 примем за начало отсчета ($t=0$)

Расчет режима до коммутации (при $t = 0_-$)

$$i_2(0_-) = i_1(0_-) = 43,5 - 32,94e^{-11,7371 \cdot t_2} \approx 31,38 \ \ A$$
$$u_{C3}(0_-) = 0$$

по независимым начальным условиям:

$$i_2(0_+) = i_2(0_-) = 31,38 \ \ A$$
$$u_{C3}(0_+) = u_{C3}(0_-) = 0 \ \ B$$

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни

$$Z(p) = R_1 + \frac{(R_2 + L_2 p)\dfrac{1}{C_3 p}}{R_2 + L_2 p + \dfrac{1}{C_3 p}} = R_1 + \frac{R_2 + L_2 p}{R_2 C_3 p + L_2 C_3 p^2 + 1} = \frac{R_1 R_2 C_3 p + R_1 L_2 C_3 p^2 + R_1 + R_2 + L_2 p}{R_2 C_3 p + L_2 C_3 p^2 + 1} = 0$$

$$R_1 L_2 C_3 p^2 + (R_1 R_2 C_3 + L_2) p + R_1 + R_2 = 0$$

$$20 \cdot 4,26 \cdot 80 \times 10^{-6} p^2 + \left(20 \cdot 30 \cdot 80 \times 10^{-6} + 4,26\right) p + 20 + 30 = 0$$

$$0,006816 p^2 + 4,308 p + 50 = 0$$

$$p_{1,2} = \frac{-4,308 \pm \sqrt{4,308^2 - 4 \cdot 0,006816 \cdot 50}}{2 \cdot 0,006816} \approx \frac{-4,308 \pm 4,146765}{0,013632}$$

$$p_1 \approx -11,83 \ \ c^{-1};$$

$$p_2 \approx -620,21 \ \ c^{-1};$$

Корни действительные и разные значит переходный процесс будет апериодическим.

Запишем свободную составляющую напряжения u_{C3}(t)

$$u_{C3св}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

, где A_1 и A_2 - постоянные интегрирования;

$|p_2| > |p_1|$, поэтому экспонента с показателем $p_2 t$ будет затухать быстрее чем с показателем $p_1 t$.

Расчет установившегося режима после коммутации.

$$i_{1пр}=i_{2пр}=\frac{E}{R_1+R_2}=\frac{2175}{50}=43{,}5\ \ A$$

$$i_{3пр}=0$$

$$u_{C3\ пр}=i_{2пр}R_2=43{,}5\cdot 30=1305\ \ B$$

По независимым начальным условиям рассчитаем токи и напряжения в схеме при $t=0_+$

По 2-у закону Кирхгофа:

$$u_{C3}(0_+)+i_1(0_+)R_1=E\ \ \Rightarrow i_1(0_+)=\frac{E-u_{C3}(0_+)}{R_1}=\frac{2175-0}{20}=108{,}75\ \ A$$

По 1-у закону Кирхгофа:

$$i_3(0_+)=i_1(0_+)-i_2(0_+)=108{,}75-31{,}38=77{,}37\ \ A$$

Свободные составляющие токов и напряжений при $t=0_+$ **найдем как разницу между переходными и принужденными величинами.**

$$i_{3св}(0_+)=i_3(0_+)-i_{3пр}=77{,}37-0=77{,}37\ \ A$$

$$u_{C3св}(0_+)=u_{C3}(0_+)-u_{C3пр}=0-1305=-1305\ \ B$$

$$i_{3св}(0_+)=C_3\frac{du_{C3\ св}(0_+)}{dt}\quad\Rightarrow\quad\frac{du_{C3\ св}(0_+)}{dt}=\frac{i_{3св}(0_+)}{C_3}=\frac{77{,}37}{80\times10^{-6}}=967125\ \ \frac{B}{c}$$

Определим постоянные интегрирования по начальным условиям

$$\begin{cases}u_{C3св}(t)=A_1e^{p_1t}+A_2e^{p_2t}\\ \dfrac{du_{C3св}(t)}{dt}=A_1p_1e^{p_1t}+A_2p_2e^{p_2t}\end{cases}$$

Подставим в эти уравнения $t=0_+$

$$\begin{cases}u_{C3св}(0_+)=A_1+A_2\\ \dfrac{du_{C3св}(0_+)}{dt}=A_1p_1+A_2p_2\end{cases}$$

$$\begin{cases}-1305=A_1+A_2\\ 967125=A_1p_1+A_2p_2\end{cases}$$

Из первого уравнения системы имеем $A_1=-A_2-1305$

Подставив это выражение во второе уравнение системы, найдем A_2

$$967125=\left(-A_2-1305\right)p_1+A_2p_2$$

$$967125+1305p_1=A_2\left(p_2-p_1\right)$$

$$\Rightarrow A_2=\frac{967125+1305p_1}{p_2-p_1}=\frac{967125+1305\cdot\left(-11{,}83\right)}{-620{,}21-\left(-11{,}83\right)}\approx-1564{,}3\ \ B$$

тогда $A_1=-A_2-1305=-\left(-1564{,}3\right)-1305=259{,}3\ \ B$

Напряжение $u_{C3}(t)$ найдем как сумму его принужденной и свободной составляющих

$$u_{C3}(t) = u_{C3пр} + u_{C3св}(t) = u_{C2пр} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = 1305 + 259,3e^{-11,83 \cdot t} - 1564,3e^{-620,21 \cdot t}, B$$

Тогда токи $i_1(t)$ и $i_3(t)$ найдем как:

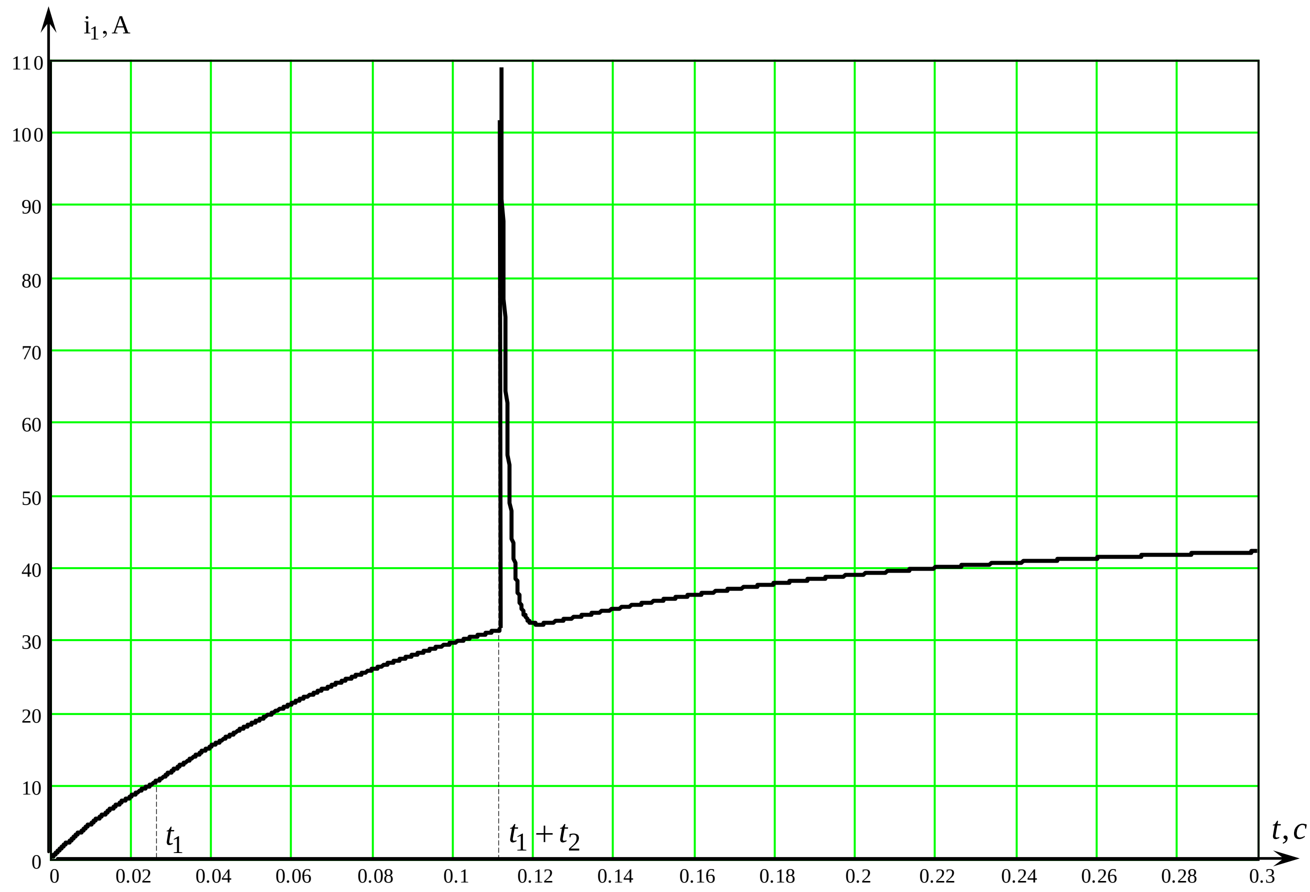
$$i_1(t) = \frac{E - u_{C3}(t)}{R_1} = \frac{2175 - \left[1305 + 259,3e^{-11,83 \cdot t} - 1564,3e^{-620,21 \cdot t}\right]}{20} =$$

$$= 43,5 - 12,965e^{-11,83 \cdot t} + 78,215e^{-620,21 \cdot t}, A$$

$$i_3(t) = C_3 \frac{du_{C3}(t)}{dt} = 80 \times 10^{-6} \cdot \left(1305 + 259,3e^{-11,83 \cdot t} - 1564,3e^{-620,21 \cdot t}\right)' =$$

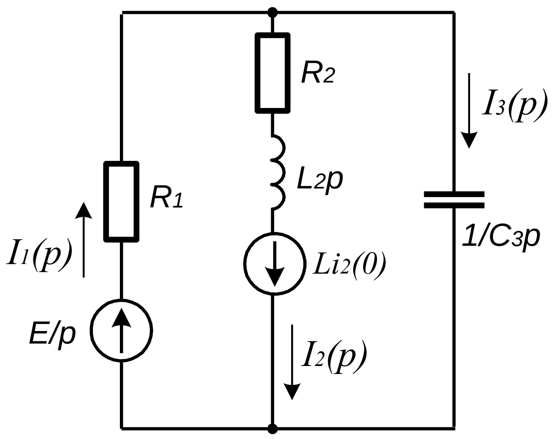
$$= -0,25e^{-11,83 \cdot t} + 77,62e^{-620,21 \cdot t}, A$$

По найденным выражениям построим в одних осях координат график $i_1(t)$ после каждой коммутации. Для построения используем математический пакет MathCad:



<u>ЧАСТЬ 2.</u> Рассчитаем ток $i_3(t)$ операторным методом после 3-й коммутации. Независимые начальные условия при этом примем из части 1, полученные классическим методом в момент 3-й коммутации.

Составим эквивалентную схему для изображений для момента времени $t = 0_+$



Начальные условия

$$i_2(0) = i_2(0_-) = i_2(0_+) = 31{,}38 \ \ A$$
$$u_{C3}(0) = u_{C3}(0_-) = u_{C3}(0_+) = 0$$

Найдем изображение тока I_3(p) с помощью уравнений составленных по первому и второму законам Кирхгофа

$$\begin{cases} -I_1(p) + I_2(p) + I_3(p) = 0 \\ I_1(p)R_1 + I_3(p)\dfrac{1}{C_3 p} = \dfrac{E}{p} \\ -I_2(p)\left(R_2 + L_2 p\right) + I_3(p)\dfrac{1}{C_3 p} = -L_2 i_2(0) \end{cases}$$

Выразим из 2-го уравнения системы $I_1(p)$ через $I_3(p)$

$$I_1(p) = \frac{E}{R_1 p} - \frac{1}{R_1 C_3 p} I_3(p)$$

Выразим из 3-го уравнения системы $I_1(p)$ через $I_3(p)$

$$I_2(p) = \frac{L_2 i_2(0)}{R_2 + L_2 p} + \frac{1}{C_3 p\left(R_2 + L_2 p\right)} I_3(p)$$

Подставим найденные выражения в первое уравнение системы и найдем $I_3(p)$

$$-I_1(p) + I_2(p) + I_3(p) = 0$$

$$-\frac{E}{R_1 p} + \frac{1}{R_1 C_3 p} I_3(p) + \frac{L_2 i_2(0)}{R_2 + L_2 p} + \frac{1}{C_3 p\left(R_2 + L_2 p\right)} I_3(p) + I_3(p) = 0$$

$$\left[\frac{1}{R_1 C_3 p} + \frac{1}{C_3 p\left(R_2 + L_2 p\right)} + 1\right] I_3(p) = \frac{E}{R_1 p} - \frac{L_2 i_2(0)}{R_2 + L_2 p}$$

$$\frac{R_2 + L_2 p + R_1 + R_1 C_3 p\left(R_2 + L_2 p\right)}{R_1 C_3 p\left(R_2 + L_2 p\right)} I_3(p) = \frac{E\left(R_2 + L_2 p\right) - R_1 p L_2 i_2(0)}{R_1 p\left(R_2 + L_2 p\right)}$$

$$\Rightarrow \ \ I_3(p) = \frac{\left(E - R_1 i_2(0)\right) L_2 C_3 p + E R_2 C_3}{R_1 L_2 C_3 p^2 + \left(R_1 R_2 C_3 + L_2\right) p + R_1 + R_2}$$

Подставим числовые значения:

$$I_3(p) = \frac{\left(E - R_1 i_2(0)\right) L_2 C_3 p + E R_2 C_3}{R_1 L_2 C_3 p^2 + \left(R_1 R_2 C_3 + L_2\right) p + R_1 + R_2} =$$

$$= \frac{\left(2175 - 20 \cdot 31,38\right) \cdot 4,26 \cdot 80 \times 10^{-6} p + 2175 \cdot 30 \cdot 80 \times 10^{-6}}{20 \cdot 4,26 \cdot 80 \times 10^{-6} p^2 + \left(20 \cdot 30 \cdot 80 \times 10^{-6} + 4,26\right) p + 20 + 30} =$$

$$= \frac{0,527354 p + 5,22}{0,006816 p^2 + 4,308 p + 50} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}$$

Найдем корни уравнения $F_2(p) = 0$

$$0,006816 p^2 + 4,308 p + 50 = 0$$

$$p_{1,2} = \frac{-4,308 \pm \sqrt{4,308^2 - 4 \cdot 0,006816 \cdot 50}}{2 \cdot 0,006816} \approx \frac{-4,308 \pm 4,146765}{0,013632}$$

$$p_1 \approx -11,83 \ c^{-1};$$

$$p_2 \approx -620,21 \ c^{-1};$$

Корни действительные и разные значит переходный процесс будет апериодическим.

Для перехода от изображения к оригиналу воспользуемся формулой разложения для простых корней.

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} \risingdotseq \sum_{k=1}^{n} \frac{F_1(p_k) \cdot e^{p_k t}}{F_2^{/}(p_k)}$$

в соответствии с этой формулой ток $i_3(t)$ будет равен:

$$i_3(t) = \frac{0,527354 p_1 + 5,22}{2 \cdot 0,006816 p_1 + 4,308} e^{p_1 t} + \frac{0,527354 p_2 + 5,22}{2 \cdot 0,006816 p_2 + 4,308} e^{p_2 t} =$$

$$= \frac{0,527354 \cdot \left(-11,83\right) + 5,22}{2 \cdot 0,006816 \cdot \left(-11,83\right) + 4,308} e^{-11,83 \cdot t} + \frac{0,527354 \cdot \left(-620,21\right) + 5,22}{2 \cdot 0,006816 \cdot \left(-620,21\right) + 4,308} e^{-620,21 \cdot t} \approx$$

$$\approx -0,25 e^{-11,83 \cdot t} + 77,62 e^{-620,21 \cdot t}, A$$

Видно, что полученное выражение для тока $i_3(t)$ после 3-й коммутации, совпадает с выражением полученным классическим методом, значит расчет произведен верно.