Міністерство освіти України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
Кафедра ТОЕ

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“

Варіант № 511

Виконав: ________________

____

____

____

Перевірив: ________________

Київ 2007

Умова задання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

1) класичним методом розрахзувати напруги на реактивних елементах та струми перехідного процесу;

2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС Е1 та напругу на реактивному елементі операторним методом;

3) побудувати в одному часовому масштабі діаграми струму та напруги на реактивних елементах.

2. Дослідити, яким повинен бути активний опір у вітці з джерелом Е1, щоб перехідний процес проходив в граничному режимі.

3. Визначити струми в вітках та напруги на реактивних елементах в момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійних ЕДС Е1і Е2 в колі діють синусоїдні джерела.

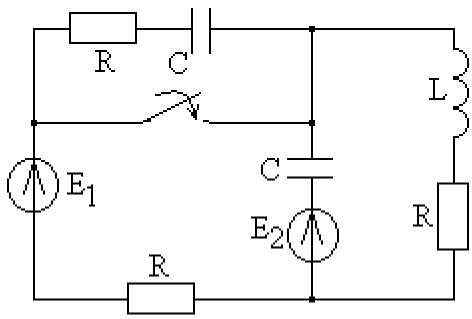
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

а) виключити катушку індуктивності чи ємність, замінивши останню опором R;

б) вважаючи, що замість ждерела постійної ЕДС Е1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивном елементі методом інтеграла Дюамеля при періоді Т, заданому в долях від τ;

г) побудувати в одному часовому масштабі діаграми напруги на вході, вхідного струму і напруги на реактивних елементі.



Основна схема

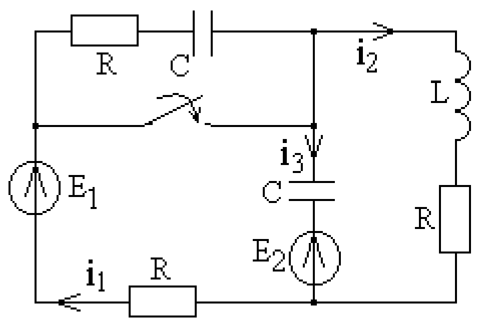
Вхідні данні:

$L := 0.15$ Гн $C := 60 \cdot 10^{-6}$ Ф $R := 30$ Ом

$E_1 := 90$ В $E_2 := 60$ В $\psi := 45 \cdot deg$ C^0 $\omega := 200$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2$ $\quad u_{Cдк} = -60$ $\quad u_{Lдк} := 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i'_2 := i'_1$ $\quad i'_2 = 1.5$

$i'_3 := 0$ $\quad u'_L := 0$

$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = -15$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad i_{20} = 0$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad u_{C0} = -60$

Залежні початкові умови

Given

$i_{20} = i_{10} - i_{30}$

$E_1 - E_2 = u_{C0} + i_{10} \cdot R$

$E_2 = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 3. \\ 3. \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 3$ $\quad i_{30} = 3$ $\quad u_{L0} = 0$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{20} = 0$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 5 \times 10^4$

Залежні початкові умови

Given

$di_{10} = di_{20} + di_{30}$

$0 = du_{C0} + di_{10} \cdot R$

$0 = di_{20} \cdot R + du_{L0} - du_{C0}$

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0})$$

$di_{10} = -1.667\times 1($ $di_{30} = -1.667\times 10^3$ $du_{L0} = 5\times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$$Z(p) := \frac{\frac{1}{p\cdot C}\cdot(R + p\cdot L)}{R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}} + R \qquad Z(p) := \frac{\frac{1}{p\cdot C}\cdot(R + p\cdot L) + R\cdot\left(R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}\right)}{R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}}$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p\cdot C}\cdot(R + p\cdot L) + R\cdot\left(R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}\right) \begin{vmatrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -377.78 - 281.97\cdot i \\ -377.78 + 281.97\cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -377.78 - 281.97i$ $\qquad p_2 = -377.78 + 281.97i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)|$ $\quad \delta = 377.78$ $\qquad \omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)|$ $\quad \omega_0 = 281.97$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

$$i''_1(t) = A\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_1)$$

$$i''_2(t) = B\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_2)$$

$$i''_3(t) = C\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_3)$$

$$u''_C(t) = D\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_C)$$

$$u''_L(t) = F\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_L)$$

Визначення сталих інтегрування:

Для струму i1(t):

Given

$$i_{10} - i'_1 = A\cdot\sin(v_1)$$

$$di_{10} = -A\cdot\delta\cdot\sin(v_1) + A\cdot\omega_0\cdot\cos(v_1)$$

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -4.1796 & 4.1796 \\ -.36708 & 2.7745 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -4.18$ $\qquad v_1 = -0.367$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow -4.1796\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t - .36708)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 1.500 - 4.180\cdot\exp(-377.8\cdot t)\cdot\sin(282.0\cdot t - .3671)$$

Для струму i2(t):

$i_{20} - i'_2 = B\cdot\sin(v_2)$

$di_{20} = -B\cdot\delta\cdot\sin(v_2) + B\cdot\omega_0\cdot\cos(v_2)$

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} 2.5078 & -2.5078 \\ -2.5004 & .64118 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = 2.508 \qquad v_2 = -2.5$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 2.5078\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t - 2.5004)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 1.500 + 2.508\cdot\exp(-377.8\cdot t)\cdot\sin(282.0\cdot t - 2.500)$

Для струму i3(t):

$i_{30} - i'_3 = C\cdot\sin(v_3)$

$di_{30} = -C\cdot\delta\cdot\sin(v_3) + C\cdot\omega_0\cdot\cos(v_3)$

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -3.5465 & 3.5465 \\ -1.0083 & 2.1333 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -3.546 \qquad v_3 = -1.008$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -3.5465\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t - 1.0083)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -3.547\cdot\exp(-377.8\cdot t)\cdot\sin(282.0\cdot t - 1.008)$

Для напруги Uc(t):

$u_{C0} - u'_C = D\cdot\sin(v_C)$

$du_{C0} = -D\cdot\delta\cdot\sin(v_C) + D\cdot\omega_0\cdot\cos(v_C)$

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -125.39 & 125.39 \\ 2.7745 & -.36708 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -125.39 \qquad v_C = 2.775$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -125.39\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t + 2.7745)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -15. - 125.4\cdot\exp(-377.8\cdot t)\cdot\sin(282.0\cdot t + 2.775)$

Для напруги Ul(t):

$u_{L0} - u'_L = F\cdot\sin(v_L)$

$du_{L0} = -F\cdot\delta\cdot\sin(v_L) + F\cdot\omega_0\cdot\cos(v_L)$

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 177.32 & -177.32 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

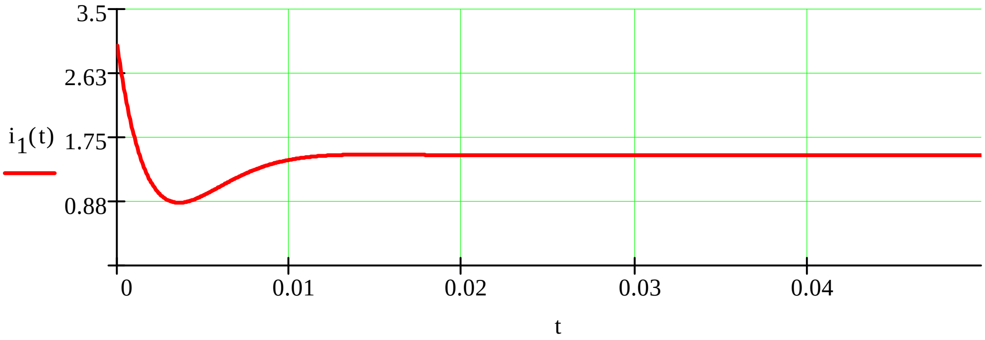
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = 177.32 \qquad v_L = 0$

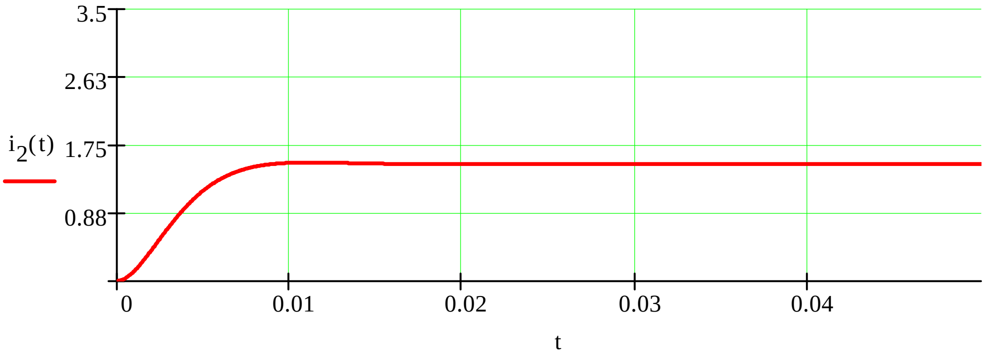
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 177.32\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t)$

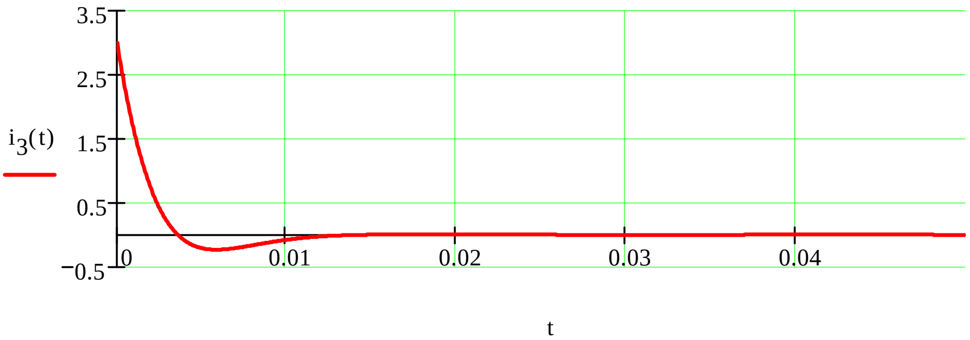
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 177.3\cdot\exp(-377.8\cdot t)\cdot\sin(282.0\cdot t)$



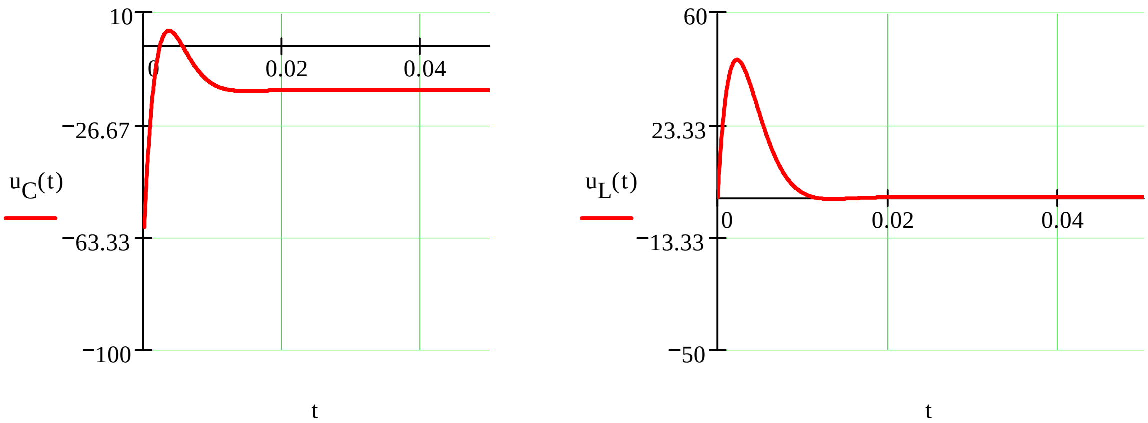
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

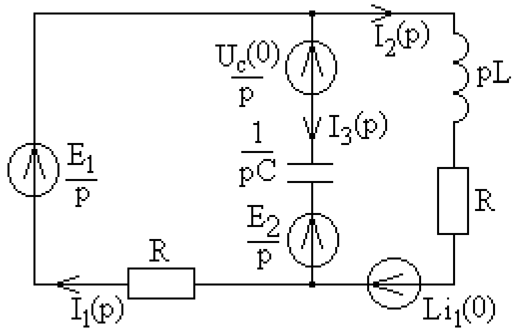


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2 \quad u_{Cдк} = -60 \quad u_{Lдк} := -u_{Cдк} + E_2 \quad u_{Lдк} = 120$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \quad i_{L0} = 0$

$u_{C0} = -60$

$$I_{k1}(p)\cdot\left(R + \frac{1}{p\cdot C}\right) - I_{k2}(p)\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p}$$

$$-I_{k1}(p)\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) + I_{k2}(p)\cdot\left(p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C}\right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20}$$

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C}\end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; \frac{1}{p^{1.}}\cdot\left(1.0000\cdot 10^{6} + 3400.0\cdot p + 4.5000\cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C}\end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; \frac{90.}{p^{1.}}\cdot\left(30. + .15\cdot p + \frac{16667.}{p^{1.}}\right)$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20}\end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; \frac{1.5000\cdot 10^{6}}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \ \Big|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 9.\cdot\frac{(600.\cdot p + 3.\cdot p^2 + 333340.)}{p\cdot(2000000. + 6800.\cdot p + 9.\cdot p^2)}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5 \ \rightarrow \frac{1.5000\cdot 10^6}{p^{1.}\cdot(1.0000\cdot 10^6 + 3400.0\cdot p + 4.5000\cdot p^{2.})^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \ \Big|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 3.\cdot\frac{(1800.\cdot p + 9.\cdot p^2 + 20.)}{p\cdot(2000000. + 6800.\cdot p + 9.\cdot p^2)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2дк}$$

$$u_L(p)\ \text{factor} \ \rightarrow \frac{450000}{(2000000 + 6800\cdot p + 9\cdot p^2)}$$

Перейдемо тепер від зображення до функції часу за формулою розкладу:
Для струму I1(p):

$$N_1(p) := 9\cdot(600.\cdot p + 3.\cdot p^2 + 333340.) \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot(2000000. + 6800.\cdot p + 9.\cdot p^2)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_1(p) \ \Big|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -377.78 - 281.97\cdot i\\ -377.78 + 281.97\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -377.78 - 281.97i \qquad p_2 = -377.78 + 281.97i$$

$$N_1(p_0) = 3\times 10^6 \qquad N_1(p_1) = 2.667\times 10^6 + 4.23i\times 10^6 \qquad N_1(p_2) = 2.667\times 10^6 - 4.23i\times 10^6$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p) \ \Big|\begin{matrix}\text{factor}\\ \text{float},5\end{matrix} \rightarrow 2.0000\cdot 10^6 + 13600.\cdot p + 27.\cdot p^{2.}$$

$$dM_1(p_0) = 2\times 10^6 \qquad dM_1(p_1) = -1.431\times 10^6 + 1.917i\times 10^6 \qquad dM_1(p_2) = -1.431\times 10^6 - 1.917i\times 10^6$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t}$$

$$i_1(t)\ \text{float},5 \ \rightarrow 1.5000 + (.75000 - 1.9506\cdot i)\cdot \exp[(-377.78 - 281.97\cdot i)\cdot t] + (.75000 + 1.9506\cdot i)\cdot \exp[(-377.78 + 281.9$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 450000 \qquad M_L(p) := 2000000 + 6800\cdot p + 9\cdot p^2$$

$$\begin{pmatrix}p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_L(p) \ \Big|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-377.78 + 281.97\cdot i\\ -377.78 - 281.97\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_1 = -377.78 + 281.97i \qquad p_2 = -377.78 - 281.97i$$

$$N_L(p_1) = 4.5\times 10^5 \qquad N_L(p_2) = 4.5\times 10^5$$

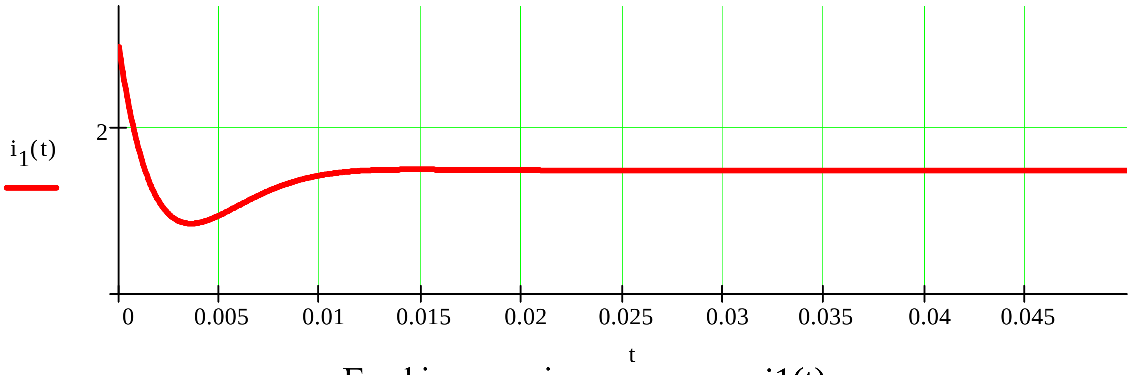
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p)\ \text{factor} \ \rightarrow 6800 + 18\cdot p$$

$$dM_L(p_1) = -0.04 + 5.075i\times 10^3 \qquad dM_L(p_2) = -0.04 - 5.075i\times 10^3$$

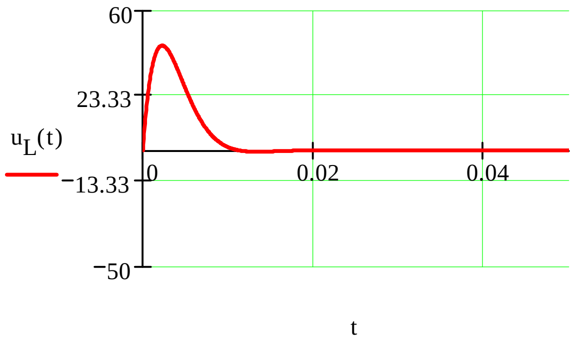
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = -1.397 \times 10^{-3}$$

$$u_L(t) \text{ float}, 3 \ \rightarrow \left(-6.99 \cdot 10^{-4} - 88.7 \cdot i\right) \cdot \exp[(-378. + 282. \cdot i) \cdot t] + \left(-6.99 \cdot 10^{-4} + 88.7 \cdot i\right) \cdot \exp[(-378. - 282. \cdot i) \cdot t]$$

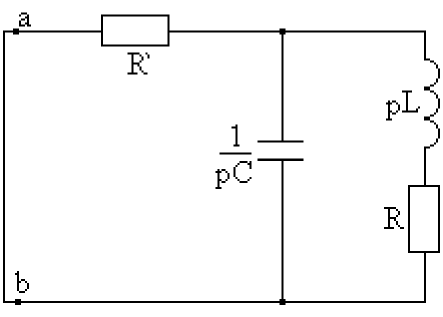


Графік перехідного струму i1(t).



Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС Е1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

$$Z_{ab}(p) := R' + \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (R + p \cdot L)}{\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L}$$



$$Z_{ab}(p) := \frac{R' \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L\right) + \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (R + p \cdot L)}{\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L}$$

$$(R' \cdot L) \cdot p^2 + \left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right) \cdot p + \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$D = 0$

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \ \begin{vmatrix} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -35.714 \\ 19.231 \end{pmatrix}$$

$R'_1 := 19.231$

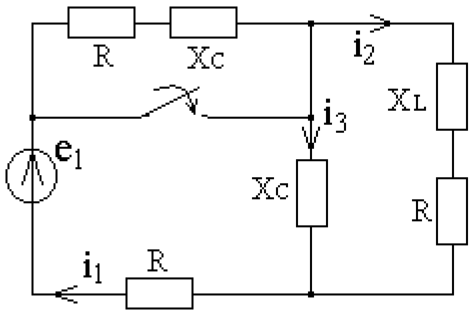
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

$e_1(t) := \sqrt{2}\cdot E_1\cdot \sin(\omega\cdot t + \psi)$ $e_2(t) := \sqrt{2}\cdot E_2\cdot \sin(\omega\cdot t + \psi)$

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $X_C = 83.333$ $X_L := \omega\cdot L$ $X_L = 30$

$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i}$ $E_1 = 63.64 + 63.64i$ $F(E_1) = (90\ \ 45)$

$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i}$ $E_2 = 42.426 + 42.426i$ $F(E_2) = (60\ \ 45)$

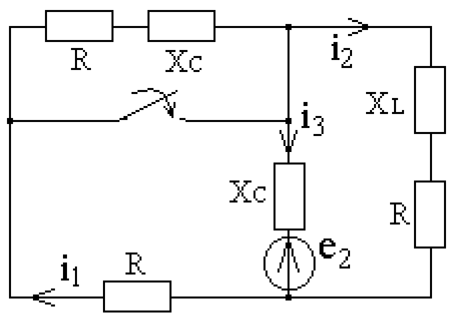


$Z'_{vx} := 2\cdot R - i\cdot X_C + \frac{(R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $Z'_{vx} = 115.638 - 67.755i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $I'_{1дк} = 0.17 + 0.65i$ $F(I'_{1дк}) = (0.672\ \ 75.367)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $I'_{2дк} = 0.635 + 0.658i$ $F(I'_{2дк}) = (0.914\ \ 46.009)$

$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$ $I'_{3дк} = -0.466 - 8.2i\times 10^{-3}$ $F(I'_{3дк}) = (0.466\ \ -178.991)$



$Z''_{vx} := -X_C\cdot i + \frac{(R + i\cdot X_L)\cdot(2\cdot R - i\cdot X_C)}{R + i\cdot X_L + R + R - i\cdot X_C}$ $Z''_{vx} = 38.772 - 68.135i$

$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$ $I''_{3дк} = -0.203 + 0.738i$ $F(I''_{3дк}) = (0.765\ \ 105.359)$

$I''_{1дк} := I''_{3дк}\cdot\frac{(R + i\cdot X_L)}{R + i\cdot X_L + R + R - i\cdot X_C}$ $I''_{1дк} = -0.31 - 5.467i\times 10^{-3}$ $F(I''_{1дк}) = (0.31\ \ -178.991)$

$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк}$ $I''_{2дк} = 0.108 + 0.743i$ $F(I''_{2дк}) = (0.751\ \ 81.763)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\quad I_{1дк} = -0.141 + 0.644i$ $\quad F(I_{1дк}) = (0.659 \;\; 102.319)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\quad I_{2дк} = 0.743 + 1.401i$ $\quad F(I_{2дк}) = (1.586 \;\; 62.076)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\quad I_{3дк} = -0.263 - 0.746i$ $\quad F(I_{3дк}) = (0.791 \;\; -109.401)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\quad u_{Cдк} = -62.186 + 21.9i$ $\quad F(u_{Cдк}) = (65.929 \;\; 160.599)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\quad u_{Lдк} = -19.328 - 4.221i$ $\quad F(u_{Lдк}) = (19.783 \;\; -167.681)$

$$i_{1дк}(t) := \left|I_{1дк}\right| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \arg\left(I_{1дк}\right)\right)$$

$$i_{2дк}(t) := \left|I_{2дк}\right| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \arg\left(I_{2дк}\right)\right)$$

$$i_{3дк}(t) := \left|I_{3дк}\right| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \arg\left(I_{3дк}\right)\right)$$

$$u_{Cдк}(t) := \left|u_{Cдк}\right| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \arg\left(u_{Cдк}\right)\right)$$

$$u_{Lдк}(t) := \left|u_{Lдк}\right| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \arg\left(u_{Lдк}\right)\right)$$

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 30.971$

$i_{20} = 1.982$

Given

$$i_{20} = i_{10} - i_{30}$$

$$e_1(0) - e_2(0) = u_{C0} + i_{10} \cdot R$$

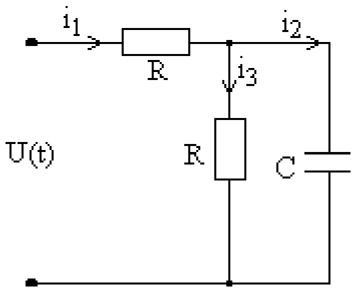
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$$

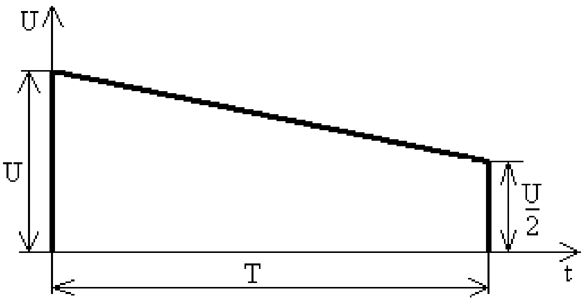
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{30}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = -0.032$ $\quad i_{20} = 1.982$ $\quad i_{30} = -2.014$ $\quad u_{L0} = 31.514$ $\quad u_{C0} = 30.971$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.9$ $\qquad E_1 := 90$ $\qquad E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{0}{R + R}$ $\qquad i_{1дк} = 0$

$i_{3дк} := i_{1дк}$ $\qquad i_{3дк} = 0$ $\qquad i_{2дк} := 0$ $\qquad i_{2дк} = 0$

$u_{Cдк} := 0 - i_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R + R}$ $\qquad i'_1 = 0.017$

$i'_3 := i'_1$ $\qquad i'_3 = 0.017$ $\qquad i'_2 := 0$ $\qquad i'_2 = 0$

$u'_C := E - i'_1 \cdot R$ $\qquad u'_C = 0.5$

Незалежні початкові умови

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\qquad u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

$i_{20} = i_{10} - i_{30}$

$E = i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R$

$0 = u_{C0} - i_{30} \cdot R$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ i_{30} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, i_{30})$$

$i_{10} = 0.033$ $\qquad i_{20} = 0.033$ $\qquad i_{30} = 0$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$$Z_{vx}(p) := R + \frac{R \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R + \frac{1}{p \cdot C}} \qquad Zvx(p) := \frac{R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \left|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix}\right. \rightarrow -1111.1 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 8.1 \times 10^{-4}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -1.111 \times 10^{3}$

Вільна складова струму буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1$ $\qquad A_1 = 0.017$

Отже: $\qquad i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Повні значення цих струмів:

$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 1.6667 \cdot 10^{-2} + 1.6667 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1111.1 \cdot t)$

$h_{cU}(t) := A_1 \cdot R - A_1 \cdot R \cdot e^{p \cdot t} \text{ float}, 5 \ \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-1111.1 \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 90$

$U_1(t) := U_0 - \frac{E_1}{2T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 90. - 55555. \cdot t \qquad 0 < t < T$

$U_2 := 0 \qquad U_2 = 0 \qquad T < t < \infty$

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow -55555.$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) \, d\tau \qquad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 2 \end{array} \right. \rightarrow .67 + 2.3 \cdot \exp\left(-1.1 \cdot 10^3 \cdot t\right) - 9.3 \cdot 10^2 \cdot t$

$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) \, d\tau + \left(U_2 - \frac{E_1}{2}\right) \cdot g_{11}(t - T)$

$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -2.00 \cdot 10^{-20} + 2.33 \cdot \exp\left(-1.11 \cdot 10^3 \cdot t\right) - 1.58 \cdot \exp\left(-1.11 \cdot 10^3 \cdot t + .900\right)$

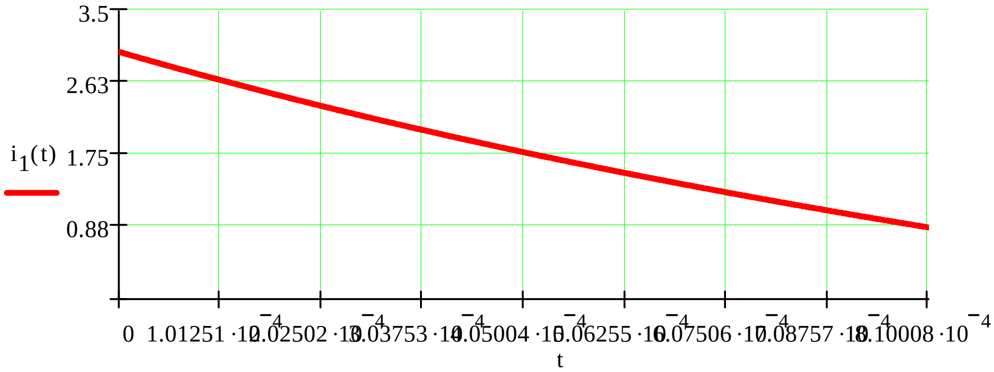
Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) \, d\tau \text{ float}, 5 \ \rightarrow 70.000 - 70.000 \cdot \exp(-1111.1 \cdot t) - 27778. \cdot t$

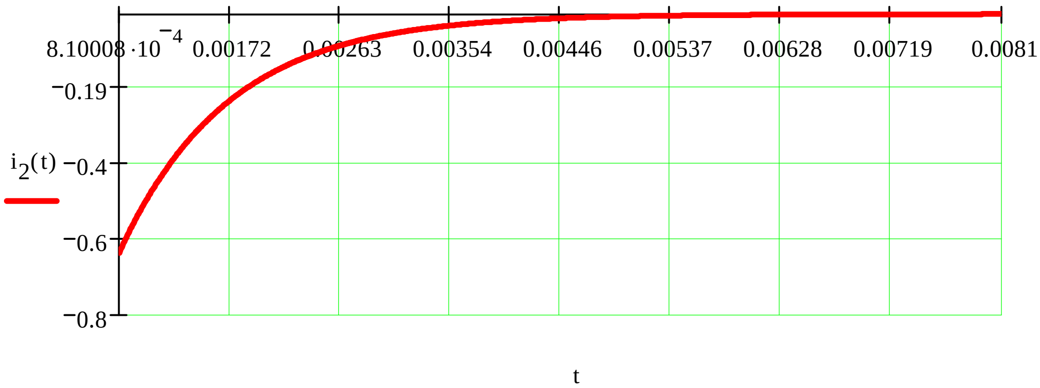
$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) \, d\tau + \left(U_2 - \frac{E_1}{2}\right) \cdot h_{cU}(t - T)$

$u_{C2}(t) \text{ float}, 3 \ \rightarrow -70.0 \cdot \exp\left(-1.11 \cdot 10^3 \cdot t\right) + 47.5 \cdot \exp\left(-1.11 \cdot 10^3 \cdot t + .900\right)$

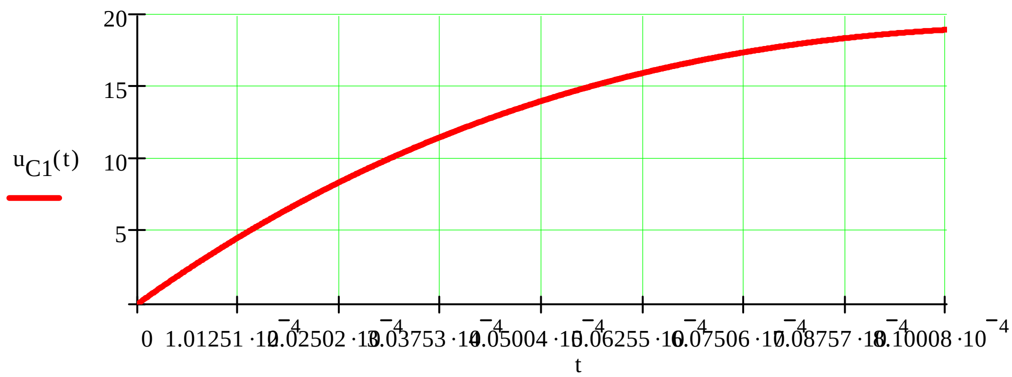
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



Графік вхідного струму на проміжку: $T \le t \le \infty$



Графік наруги на реактивному елементі на проміжку: $0 \le t \le T$



Графік наруги на реактивному елементі на проміжку: $T \le t \le \infty$