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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 042

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 E1 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 E1, 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 E1і E2 в колі діють синусоїдні джерела.

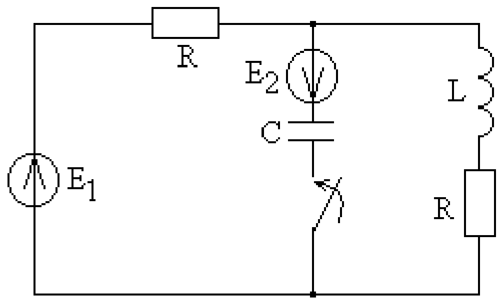
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

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

б) вважаючи, що замість ждерела постійної ЕДС E1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

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

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



Основна схема

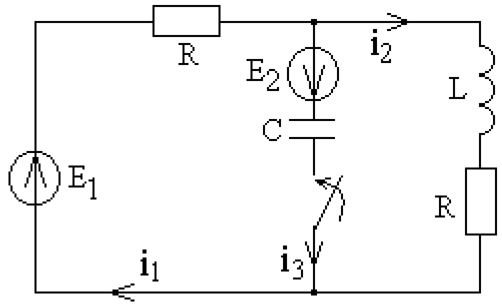
Вхідні данні:

$L := 0.17$ Гн $C := 50 \cdot 10^{-6}$ Ф $R := 25$ Ом

$E_1 := 60$ В $E_2 := 140$ В $\psi := 60 \cdot deg$ C^0 $\omega := 250$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1}{2 \cdot R}$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.2$

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\qquad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2 \cdot R}$ $\qquad i'_2 := i'_1 \qquad i'_2 = 1.2$

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

$u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\qquad u'_C = 170$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\qquad i_{20} = 1.2$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \rightarrow \begin{pmatrix} 8 \\ \dfrac{34}{5} \\ -170 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 8$ $\qquad i_{30} = 6.8$ $\qquad u_{L0} = -170$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\qquad di_{20} = -1 \times 10^3$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\qquad du_{C0} = 1.36 \times 10^5$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = -5.44 \times 10^{3}$ $di_{30} = -4.44 \times 10^{3}$ $du_{L0} = 1.61 \times 10^{5}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 6 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -473.529 - 105.186 \cdot i \\ -473.529 + 105.186 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -473.529 - 105.186i$ $\qquad p_2 = -473.529 + 105.186i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)|$ $\quad \delta = 473.529$ $\qquad \omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)|$ $\quad \omega_0 = 105.186$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1)\ \mathrm{float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -22.174 & 22.174 \\ -.31169 & 2.8299 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -22.174$ $\qquad v_1 = -0.312$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1)\ \mathrm{float}, 5 \rightarrow -22.174 \cdot \exp(-473.53 \cdot t) \cdot \sin(105.19 \cdot t - .31169)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)\ \mathrm{float}, 4 \rightarrow 1.200 - 22.17 \cdot \exp(-473.5 \cdot t) \cdot \sin(105.2 \cdot t - .3117)$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -9.5070 & 9.5070 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -9.507$ $\quad v_2 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -9.5070 \cdot \exp(-473.53 \cdot t) \cdot \sin(105.19 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 1.200 - 9.507 \cdot \exp(-473.5 \cdot t) \cdot \sin(105.2 \cdot t)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -13.445 & 13.445 \\ -.53027 & 2.6113 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -13.445$ $\quad v_3 = -0.53$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -13.445 \cdot \exp(-473.53 \cdot t) \cdot \sin(105.19 \cdot t - .53027)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -13.45 \cdot \exp(-473.5 \cdot t) \cdot \sin(105.2 \cdot t - .5303)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C) \left| \begin{array}{l} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -554.35 & 554.35 \\ 2.8299 & -.31169 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -554.35$ $\quad v_C = 2.83$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -554.35 \cdot \exp(-473.53 \cdot t) \cdot \sin(105.19 \cdot t + 2.8299)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 170. - 554.4 \cdot \exp(-473.5 \cdot t) \cdot \sin(105.2 \cdot t + 2.830)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L) \left| \begin{array}{l} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -783.97 & 783.97 \\ 2.9230 & -.21858 \end{pmatrix}$

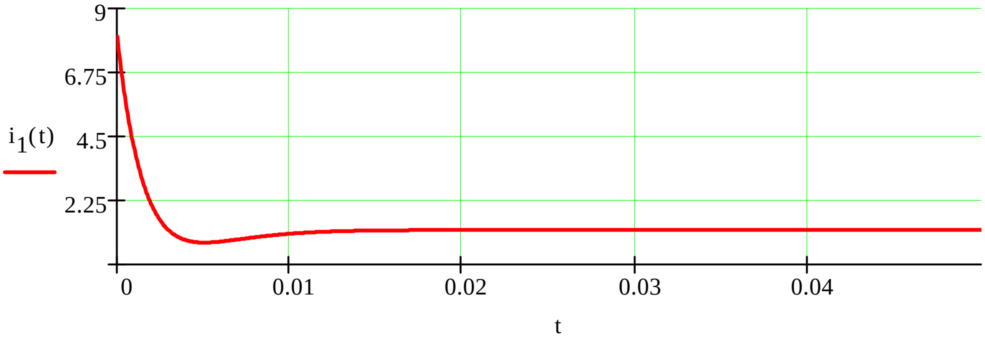
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -783.97$ $\quad v_L = 2.923$

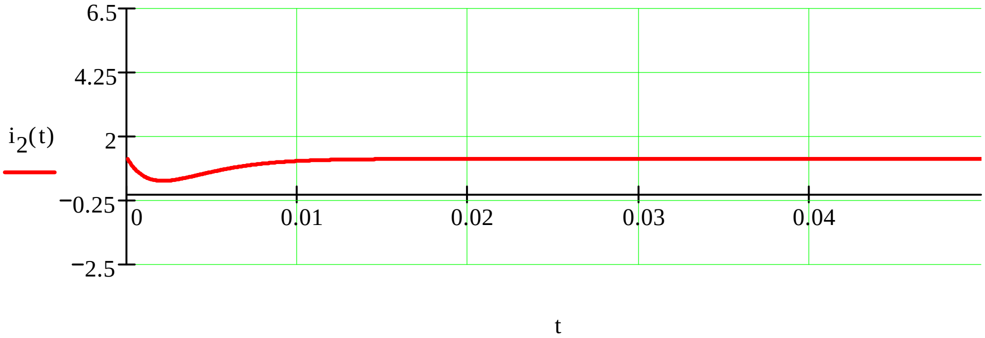
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -783.97 \cdot \exp(-473.53 \cdot t) \cdot \sin(105.19 \cdot t + 2.9230)$

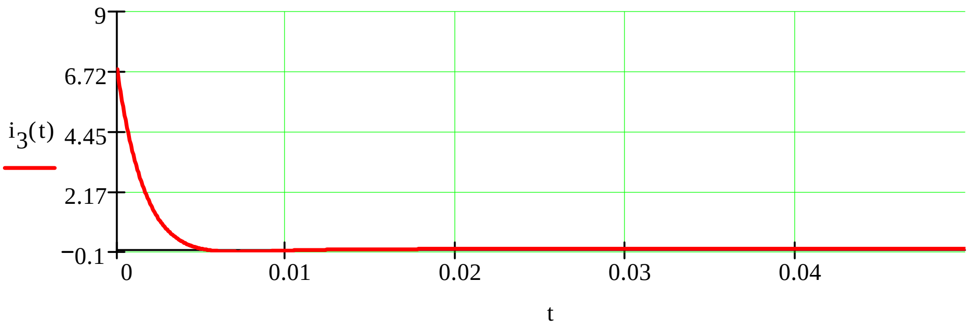
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -784.0 \cdot \exp(-473.5 \cdot t) \cdot \sin(105.2 \cdot t + 2.923)$



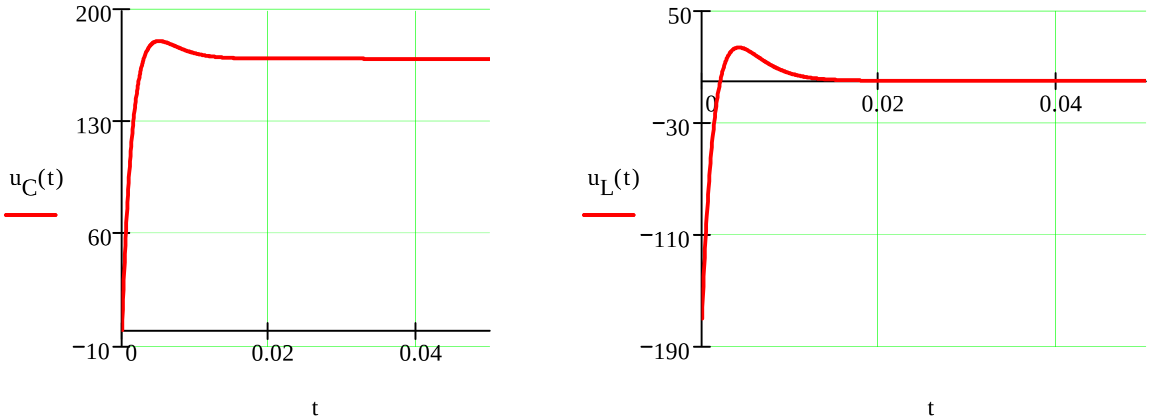
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

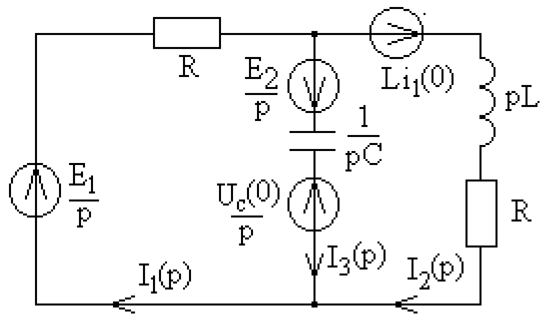


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.2$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - i_{1дк} \cdot R \quad u_{Cдк} = 170$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \quad i_{L0} = 1.2$

$u_{C0} = 0$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(1.0000 \cdot 10^6 + 4025.0 \cdot p + 4.25 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(1.2000 \cdot 10^6 + 9080.0 \cdot p + 34.00 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(580.00 \cdot p + 5.1000 \cdot p^{2.} + 1.2000 \cdot 10^6\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(1.2000\cdot 10^6 + 9080.0\cdot p + 34.00\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(1.0000\cdot 10^6 + 4025.0\cdot p + 4.25\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(580.00\cdot p + 5.1000\cdot p^{2.} + 1.2000\cdot 10^6\right)}{p^{1.}\cdot\left(1.0000\cdot 10^6 + 4025.0\cdot p + 4.25\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \Big|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 6.8000000000000000000\cdot\frac{(5000. + 17.\cdot p)}{\left(4000000. + 16100.\cdot p + 17.\cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2дк}\ \text{factor}\ \rightarrow -2890\cdot\frac{p}{\left(4000000 + 16100\cdot p + 17\cdot p^2\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p\cdot C}\ \text{factor}\ \rightarrow 136000\cdot\frac{(5000 + 17\cdot p)}{\left(4000000 + 16100\cdot p + 17\cdot p^2\right)\cdot p}$$

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

$$N_1(p) := 1.2000\cdot 10^6 + 9080.0\cdot p + 34.00\cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p\cdot\left(1.0000\cdot 10^6 + 4025.0\cdot p + 4.25\cdot p^{2.}\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \Big|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -473.53 - 105.19\cdot i\\ -473.53 + 105.19\cdot i\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -473.53 - 105.19i \qquad p_2 = -473.53 + 105.19i$

$N_1(p_0) = 1.2\times 10^6 \qquad N_1(p_1) = 4.148\times 10^6 + 2.432i\times 10^6 \qquad N_1(p_2) = 4.148\times 10^6 - 2.432i\times 10^6$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \Big|\begin{matrix}\text{factor}\\ \text{float},5\end{matrix} \rightarrow 1.0000\cdot 10^6 + 8050.\cdot p + 12.750\cdot p^{2.}$$

$dM_1(p_0) = 1\times 10^6 \qquad dM_1(p_1) = -9.405\times 10^4 + 4.234i\times 10^5 \qquad dM_1(p_2) = -9.405\times 10^4 - 4.234i\times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad i_1(0.1) = 1.2$$

$$i_1(t)\ \Big|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 1.2000 + 6.8000\cdot\exp(-473.53\cdot t)\cdot\cos(105.19\cdot t) - 21.104\cdot\exp(-473.53\cdot t)\cdot\sin(105.19\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 136000\cdot(5000 + 17\cdot p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(4000000 + 16100\cdot p + 17\cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_u(p)\ \Big|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -473.53 + 105.19\cdot i\\ -473.53 - 105.19\cdot i\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -473.53 + 105.19i \qquad p_2 = -473.53 - 105.19i$

$N_u(p_0) = 6.8\times10^8$ $\quad N_u(p_1) = -4.148\times10^8 + 2.432i\times10^8$ $\quad N_u(p_2) = -4.148\times10^8 - 2.432i\times10^8$

$dM_u(p) := \frac{d}{dp}M_u(p)$ factor $\rightarrow 4000000 + 32200\cdot p + 51\cdot p^2$

$dM_u(p_0) = 4\times10^6$ $\quad dM_u(p_1) = -3.762\times10^5 - 1.694i\times10^6$ $\quad dM_u(p_2) = -3.762\times10^5 + 1.694i\times10^6$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = 3.169\times10^{-3}$$

$$u_C(t) \left|\begin{array}{l}\text{float},5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow 170. - 169.996\cdot\exp(-473.53\cdot t)\cdot\cos(105.19\cdot t) + 527.62\cdot\exp(-473.53\cdot t)\cdot\sin(105.19\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := -2890p$ $\qquad M_L(p) := (4000000 + 16100\cdot p + 17\cdot p^2)$

$$\begin{pmatrix}p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_L(p) \left|\begin{array}{l}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}-473.53 + 105.19\cdot i\\ -473.53 - 105.19\cdot i\end{pmatrix}$$

$p_1 = -473.53 + 105.19i$ $\qquad p_2 = -473.53 - 105.19i$

$N_L(p_1) = 1.369\times10^6 - 3.04i\times10^5$ $\qquad N_L(p_2) = 1.369\times10^6 + 3.04i\times10^5$

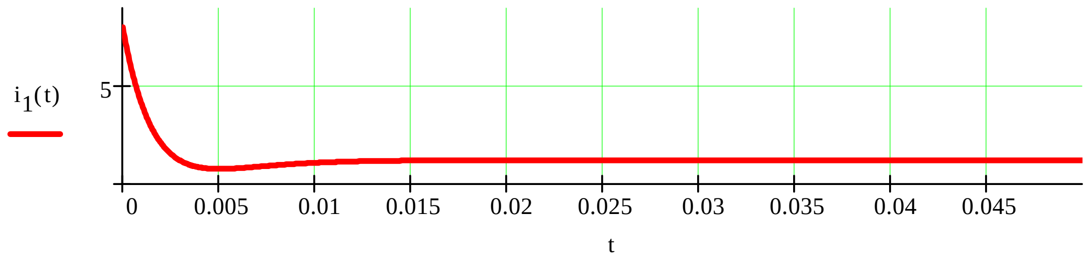
$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p)$ factor $\rightarrow 16100 + 34\cdot p$

$dM_L(p_1) = -0.02 + 3.576i\times10^3$ $\qquad dM_L(p_2) = -0.02 - 3.576i\times10^3$

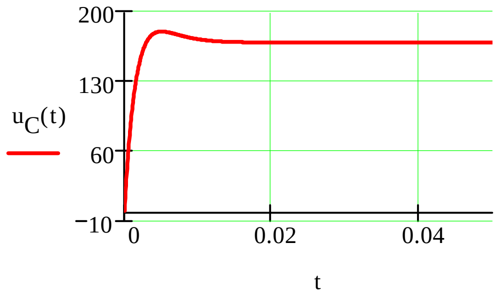
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

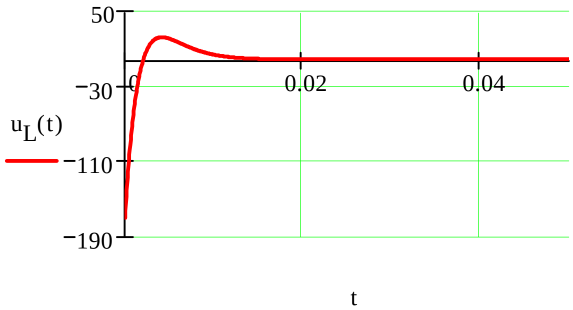
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_L(0) = -170.004$$

$$u_L(t) \left|\begin{array}{l}\text{float},5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow -170.004\cdot\exp(-473.53\cdot t)\cdot\cos(105.19\cdot t) + 765.28\cdot\exp(-473.53\cdot t)\cdot\sin(105.19\cdot t)$$

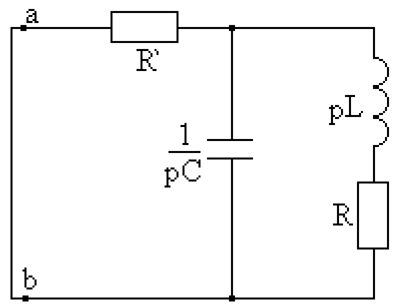


Графік перехідного струму i1(t).





Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС E1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний



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

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

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

$D = 0$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \ \Bigg|\begin{matrix} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -37.110 \\ 24.008 \end{pmatrix}$$

$R'_1 := 24.008$

Отже при такому значенні активного опору у вітці з джерелом напруги E1 аперіодичний процес перейде в коливальний.

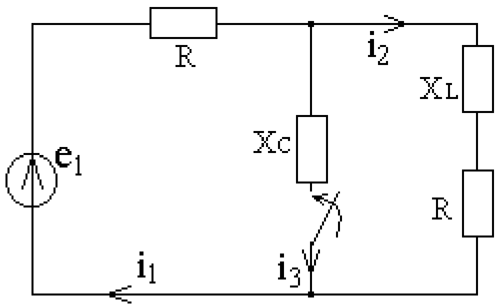
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C}$ $\qquad$ $X_C = 80$ $\qquad$ $X_L := \omega \cdot L$ $\qquad$ $X_L = 42.5$

$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i}$ $\qquad$ $E_1 = 30 + 51.962i$ $\qquad$ $F(E_1) = (60 \;\; 60)$

$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i}$ $\qquad$ $E_2 = 70 + 121.244i$ $\qquad$ $F(E_2) = (140 \;\; 60)$

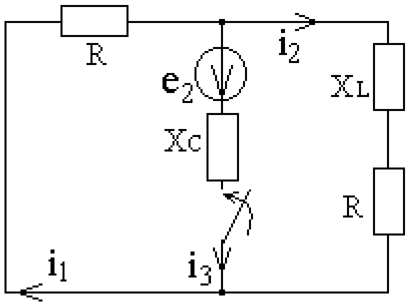


$Z'_{vx} := 2 \cdot R + X_L \cdot i$ $\qquad$ $Z'_{vx} = 50 + 42.5i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad$ $I'_{1дк} = 0.861 + 0.307i$ $\qquad$ $F(I'_{1дк}) = (0.914 \;\; 19.635)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}$ $\qquad$ $I'_{2дк} = 0.861 + 0.307i$ $\qquad$ $F(I'_{2дк}) = (0.914 \;\; 19.635)$

$I'_{3дк} := 0$



$I''_{2дк} := 0$ $\quad I''_{2дк} = 0$

$I''_{1дк} := 0$ $\quad I''_{1дк} = 0$

$I''_{3дк} := 0$ $\quad I''_{3дк} = 0$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\quad I_{1дк} = 0.861 + 0.307i$ $\quad F(I_{1дк}) = (0.914 \quad 19.635)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\quad I_{2дк} = 0.861 + 0.307i$ $\quad F(I_{2дк}) = (0.914 \quad 19.635)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\quad I_{3дк} = 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - I_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 78.471 + 165.524i$ $\quad F(u_{Cдк}) = (183.183 \quad 64.635)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\quad u_{Lдк} = -13.058 + 36.599i$ $\quad F(u_{Lдк}) = (38.859 \quad 109.635)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 234.086$

$i_{Lдк}(0) = 0.435$

Given

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

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

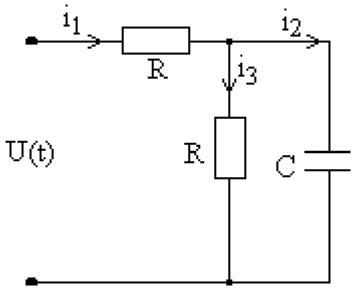
$$-e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0} + u_{L0}$$

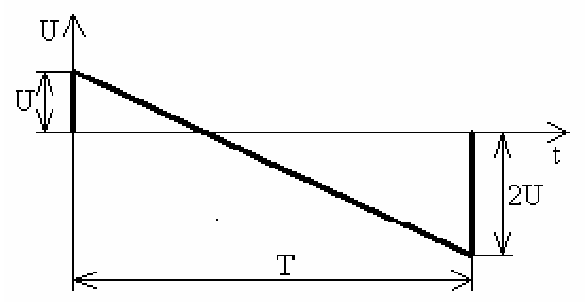
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{30}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 12.303$ $\quad i_{20} = 0.435$ $\quad i_{30} = 11.868$ $\quad u_{L0} = 51.759$ $\quad u_{C0} = 234.086$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.2$ $E_1 := 60$ $E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R + R}$ $i'_1 = 0.02$

$i'_3 := i'_1$ $i'_3 = 0.02$ $i'_2 := 0$ $i'_2 = 0$

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

Незалежні початкові умови

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$i_{10} = 0.04$ $i_{20} = 0.04$ $i_{30} = 0$

Вільний режим після комутаиії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \;\Bigg|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -1600. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 7.5 \times 10^{-4}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -1.6 \times 10^3$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = 0.02$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 2.0000 \cdot 10^{-2} + 2.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1600. \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R+R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float}, 5 \ \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-1600. \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 60$

$U_1(t) := U_0 - \dfrac{3E_1}{T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 60. - 2.4000 \cdot 10^5 \cdot t \qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \dfrac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow -2.4000 \cdot 10^5$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \ \Big|_{\text{float}, 3}^{\text{factor}} \rightarrow -1.80 + 4.20 \cdot \exp\left(-1.60 \cdot 10^3 \cdot t\right) - 4.80 \cdot 10^3 \cdot t$$

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

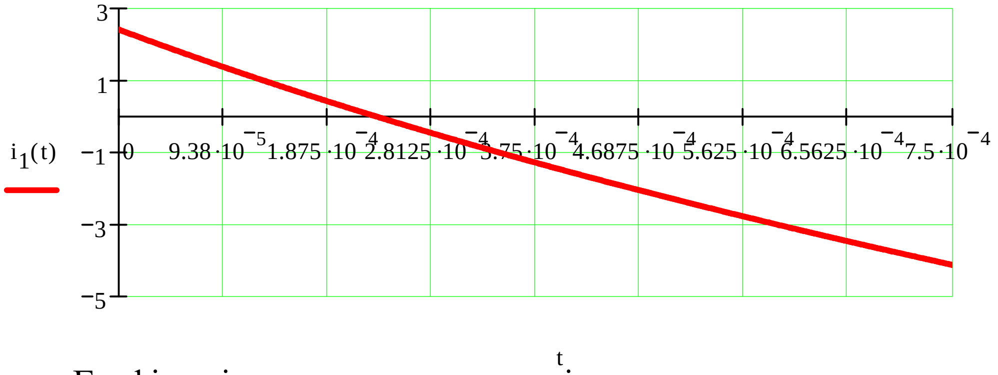
$$i_2(t) \ \Big|_{\text{float}, 3}^{\text{factor}} \rightarrow 4.20 \cdot \exp\left(-1.60 \cdot 10^3 \cdot t\right) - .600 \cdot \exp\left(-1.60 \cdot 10^3 \cdot t + 1.20\right)$$

Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

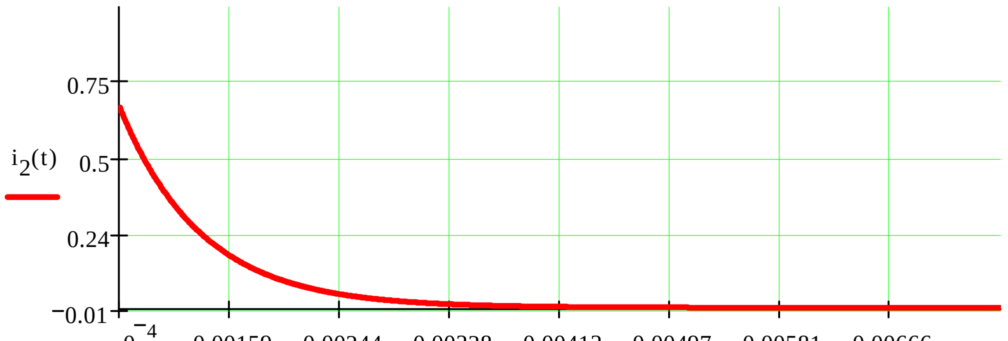
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \ \rightarrow 105.0 - 105.0 \cdot \exp(-1600. \cdot t) - 1.200 \cdot 10^5 \cdot t$$

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

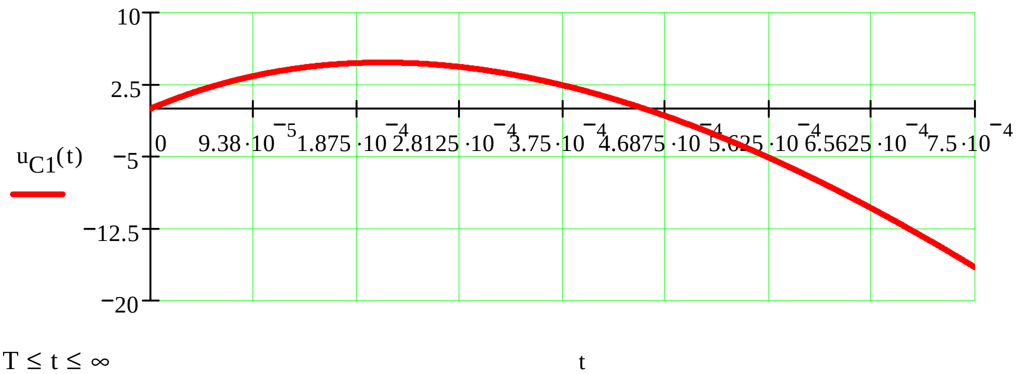
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$