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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 402

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.

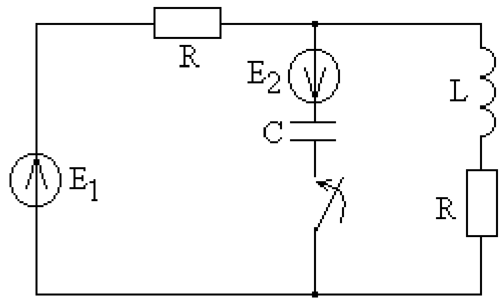
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

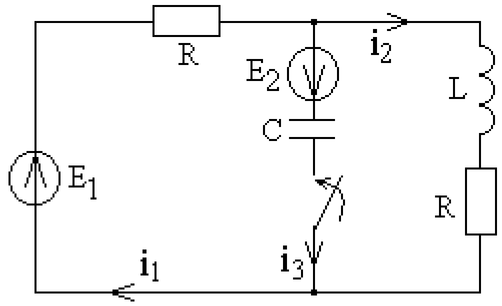
Вхідні данні:

$L := 0.15$ Гн $C := 700 \cdot 10^{-6}$ Ф $R := 50$ Ом

$E_1 := 100$ В $E_2 := 80$ В $\psi := 30 \cdot deg$ C^0 $\omega := 100$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\quad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 1$

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

$u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 130$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad i_{20} = 1$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})\ \mathrm{float}, 6 \ \rightarrow \begin{pmatrix} 3.60000 \\ 2.60000 \\ -130. \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 3.6$ $\quad i_{30} = 2.6$ $\quad u_{L0} = -130$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{20} = -866.667$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 3.714 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = -74.286$ $di_{30} = 792.381$ $du_{L0} = 4.705 \times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 6 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -297.983 \\ -63.9219 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -297.983$ $p_2 = -63.922$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

$i''_1(t) = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$

$i''_2(t) = B_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + B_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$

$i''_3(t) = C_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$

$u''_C(t) = D_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + D_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$

$u''_L(t) = F_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + F_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$

Визначення сталих інтегрування:

Given

$i_{10} - i'_1 = A_1 + A_2$

$di_{10} - 0 = p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A_1, A_2)$$

$A_1 = -0.393$ $A_2 = 2.993$

Отже вільна складова струму i1(t) буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -.39268 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.9927 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ float, 5 $\rightarrow 1. - .39268 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.9927 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $i_1(0) = 3.6$

Given

$i_{20} - i'_2 = B_1 + B_2$

$di_{20} - 0 = p_1 \cdot B_1 + p_2 \cdot B_2$

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2)$$

$B_1 = 3.703$ $B_2 = -3.703$

Отже вільна складова струму i2(t) буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + B_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow 3.7027 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 3.7027 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)$ float, 5 $\rightarrow 1. + 3.7027 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 3.7027 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_2(0) = 1$

Given

$i_{30} - i'_3 = C_1 + C_2$

$di_{30} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2$

$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2)$ $\qquad C_1 = -4.095 \qquad C_2 = 6.695$

Отже вільна складова струму i3(t) буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -4.0954 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 6.6954 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ float, 5 $\rightarrow -4.0954 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 6.6954 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_3(0) = 2.6$

Given

$u_{C0} - u'_C = D_1 + D_2$

$du_{C0} - 0 = p_1 \cdot D_1 + p_2 \cdot D_2$

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2)$ $\qquad D_1 = 19.634 \qquad D_2 = -149.634$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + D_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 6 $\rightarrow 19.6340 \cdot \exp(-297.983 \cdot t) - 149.634 \cdot \exp(-63.9219 \cdot t)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)$ float, 5 $\rightarrow 130. + 19.634 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 149.63 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

Given

$u_{L0} - u'_L = F_1 + F_2$

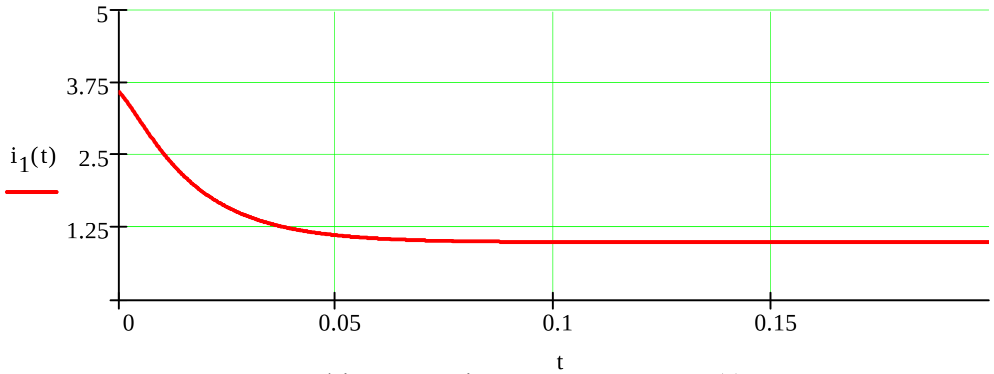
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2)$ $\qquad F_1 = -165.503 \qquad F_2 = 35.503$

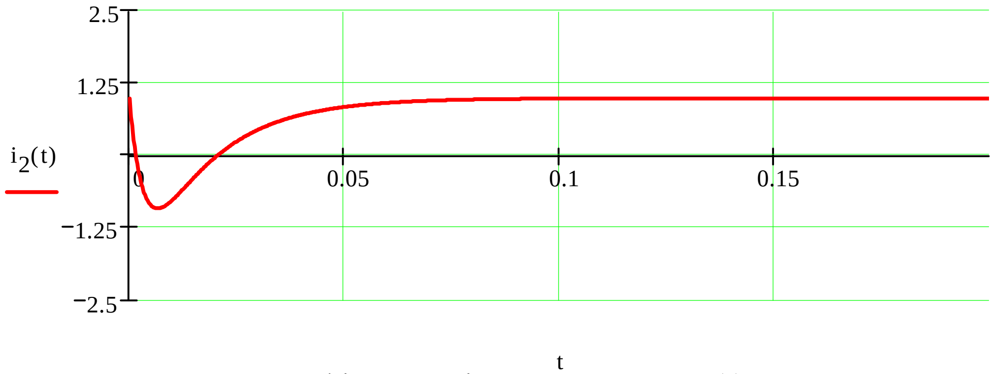
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + F_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -165.50 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 35.503 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

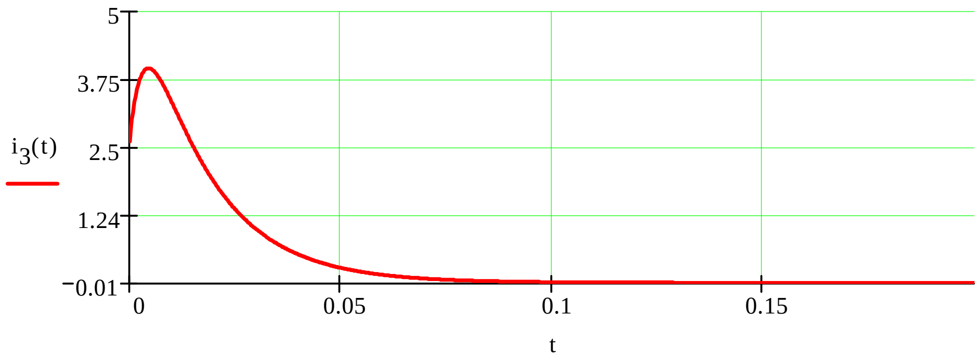
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)$ float, 5 $\rightarrow -165.50 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 35.503 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad u_L(0) = -129.99$



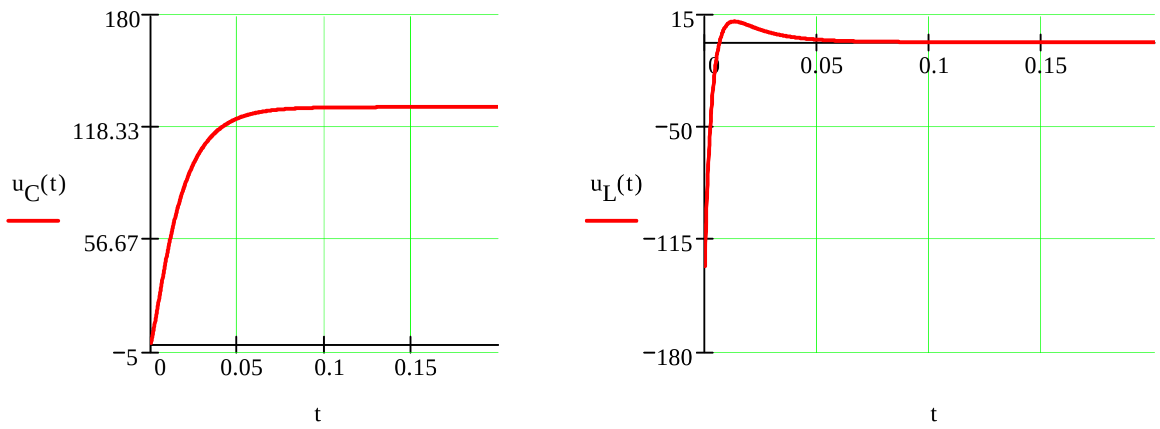
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

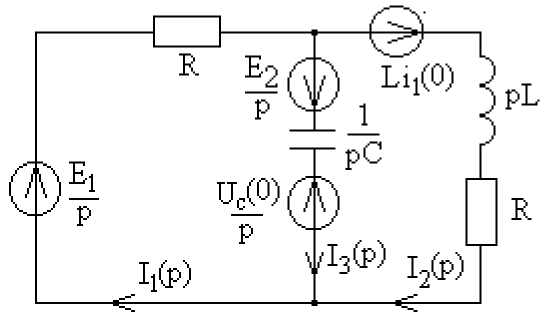


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0 \qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - i_{1дк} \cdot R \qquad u_{Cдк} = 130$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \qquad i_{L0} = 1$

$u_{C0} = 0$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(9214.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 27.00 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(-3785.7 \cdot p + 7.5000 \cdot p^{2.} + 1.4286 \cdot 10^5\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \mathrm{float},5\ \rightarrow \frac{\left(9214.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 27.00\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(2714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \mathrm{float},5\ \rightarrow \frac{\left(-3785.7\cdot p + 7.5000\cdot p^{2.} + 1.4286\cdot 10^5\right)}{p^{1.}\cdot\left(2714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \left|\begin{matrix}\mathrm{float},5\\ \mathrm{simplify}\end{matrix}\right. \rightarrow 65.\cdot\frac{(2000. + 3.\cdot p)}{\left(27143.\cdot p + 1428600. + 75.\cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2дк}\ \mathrm{factor}\ \rightarrow -9750\cdot\frac{p}{\left(27143\cdot p + 1428600 + 75\cdot p^2\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p\cdot C}\ \mathrm{factor}\ \rightarrow \frac{650000}{7}\cdot\frac{(2000 + 3\cdot p)}{\left(27143\cdot p + 1428600 + 75\cdot p^2\right)\cdot p}$$

Перейдемо тепер від зображення до функції часу за формулою розкладу:

Для струму I1(p):

$$N_1(p) := \left(9214.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 27.00\cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(2714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \left|\begin{matrix}\mathrm{solve},p\\ \mathrm{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -297.98\\ -63.923\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\quad p_1 = -297.98$ $\quad p_2 = -63.923$

$N_1(p_0) = 1.429\times 10^5$ $\quad N_1(p_1) = -2.054\times 10^5$ $\quad N_1(p_2) = -3.358\times 10^5$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \left|\begin{matrix}\mathrm{factor}\\ \mathrm{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow 5428.6\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 22.500\cdot p^{2.}$$

$dM_1(p_0) = 1.429\times 10^5$ $\quad dM_1(p_1) = 5.231\times 10^5$ $\quad dM_1(p_2) = -1.122\times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad i_1(0) = 3.6$$

$$i_1(t)\ \left|\begin{matrix}\mathrm{float},5\\ \mathrm{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow 1.0000 - .39274\cdot\exp(-297.98\cdot t) + 2.9927\cdot\exp(-63.923\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := \frac{650000}{7}\cdot(2000 + 3\cdot p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(27143\cdot p + 1428600 + 75\cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_2\\ p_1\\ p_0\end{pmatrix} := M_u(p)\ \left|\begin{matrix}\mathrm{solve},p\\ \mathrm{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -63.92\\ -297.98\end{pmatrix}$$

$p_0 = -297.98$ $\quad p_1 = -63.92$ $\quad p_2 = 0$

$N_u(p_0) = 1.027 \times 10^8$ $\quad N_u(p_1) = 1.679 \times 10^8$ $\quad N_u(p_2) = 1.857 \times 10^8$

$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p)$ factor $\rightarrow 54286 \cdot p + 1428600 + 225 \cdot p^2$

$dM_u(p_0) = 5.231 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_1) = -1.122 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_2) = 1.429 \times 10^6$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = -9.491 \times 10^{-3}$$

$u_C(t) \,\Big|\begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow 149.63 - 149.64 \cdot \exp(-63.92 \cdot t)$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := -9750p$ $\qquad M_L(p) := \left(27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2\right)$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \,\Big|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -63.92 \\ -297.98 \end{pmatrix}$$

$p_1 = -63.92$ $\qquad p_2 = -297.98$

$N_L(p_1) = 6.232 \times 10^5$ $\qquad N_L(p_2) = 2.905 \times 10^6$

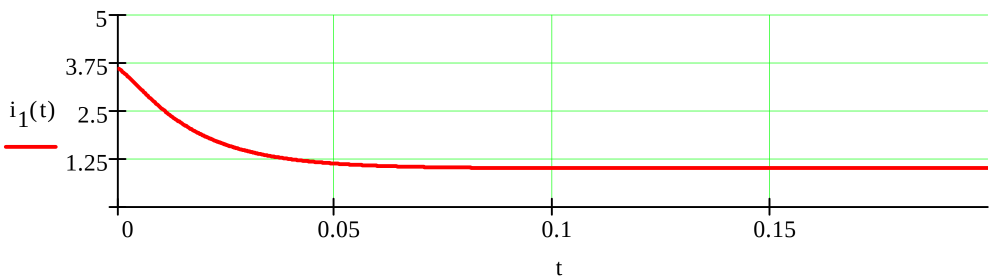
$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p)$ factor $\rightarrow 27143 + 150 \cdot p$

$dM_L(p_1) = 1.756 \times 10^4$ $\qquad dM_L(p_2) = -1.755 \times 10^4$

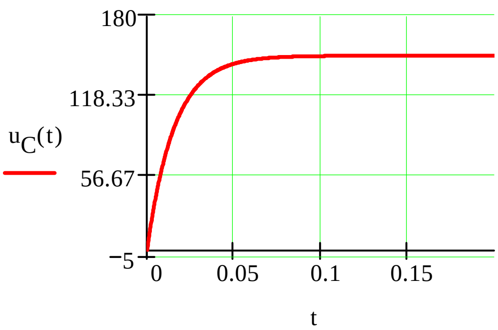
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

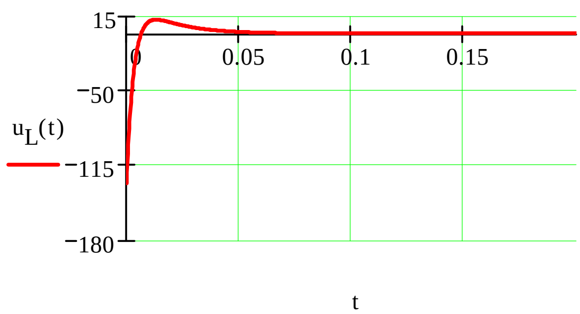
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = -130.006$$

$u_L(t) \,\Big|\begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow 35.501 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) - 165.51 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$

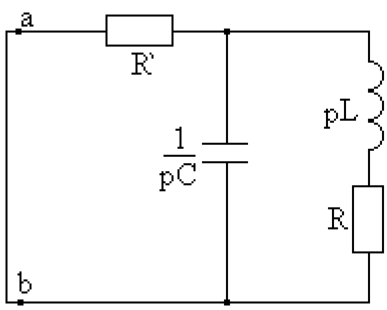


Графік перехідного струму i1(t).





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



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

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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R'\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \left|\begin{array}{l}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}2.7030 \\ 10.340\end{pmatrix}$$

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

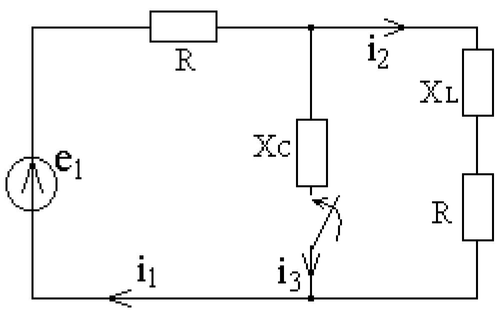
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $\qquad$ $X_C = 14.286$ $\qquad$ $X_L := \omega\cdot L$ $\qquad$ $X_L = 15$

$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\qquad$ $E_1 = 86.603 + 50i$ $\qquad$ $F(E_1) = (100 \;\; 30)$

$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\qquad$ $E_2 = 69.282 + 40i$ $\qquad$ $F(E_2) = (80 \;\; 30)$

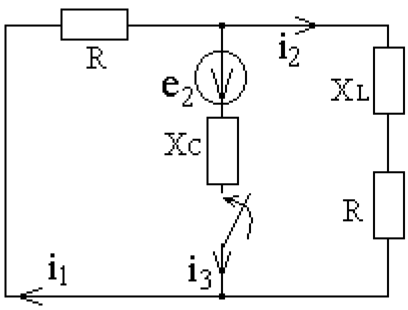


$Z'_{vx} := 2\cdot R + X_L\cdot i$ $\qquad$ $Z'_{vx} = 100 + 15i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad$ $I'_{1дк} = 0.92 + 0.362i$ $\qquad$ $F(I'_{1дк}) = (0.989 \;\; 21.469)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}$ $\qquad$ $I'_{2дк} = 0.92 + 0.362i$ $\qquad$ $F(I'_{2дк}) = (0.989 \;\; 21.469)$

$I'_{3дк} := 0$



$I''_{2дк} := 0$ $I''_{2дк} = 0$

$I''_{1дк} := 0$ $I''_{1дк} = 0$

$I''_{3дк} := 0$ $I''_{3дк} = 0$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $I_{1дк} = 0.92 + 0.362i$ $F(I_{1дк}) = (0.989 \quad 21.469)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $I_{2дк} = 0.92 + 0.362i$ $F(I_{2дк}) = (0.989 \quad 21.469)$

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

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - I_{1дк} \cdot R$ $u_{Cдк} = 109.869 + 71.902i$ $F(u_{Cдк}) = (131.305 \quad 33.202)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $u_{Lдк} = -5.429 + 13.805i$ $F(u_{Lдк}) = (14.834 \quad 111.469)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 101.685$

$i_{Lдк}(0) = 0.512$

Given

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

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

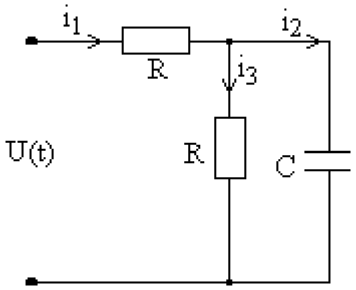
$$-e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0} + u_{L0}$$

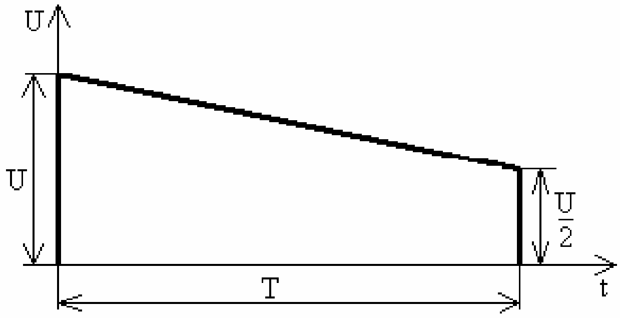
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{30}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 3.448$ $i_{20} = 0.512$ $i_{30} = 2.936$ $u_{L0} = 19.523$ $u_{C0} = 101.685$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.0$ $\qquad E_1 := 100$ $\qquad E := 1$





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: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R + R}$ $\qquad i'_1 = 0.01$

$i'_3 := i'_1$ $\qquad i'_3 = 0.01$ $\qquad i'_2 := 0$ $\qquad i'_2 = 0$

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

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$i_{10} = 0.02$ $\qquad i_{20} = 0.02$ $\qquad i_{30} = 0$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \;\Big|\; \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -57.143 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 0.017$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -57.143$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = 0.01$

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

Повні значення цих струмів:

$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 1.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-57.143 \cdot t)$

$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float}, 5 \ \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-57.143 \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 100$

$U_1(t) := U_0 - \frac{E_1}{2T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 100. - 2857.1 \cdot t \qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow -2857.1$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \ \Big| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \rightarrow .500 + 1.50 \cdot \exp(-57.1 \cdot t) - 28.6 \cdot t$

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

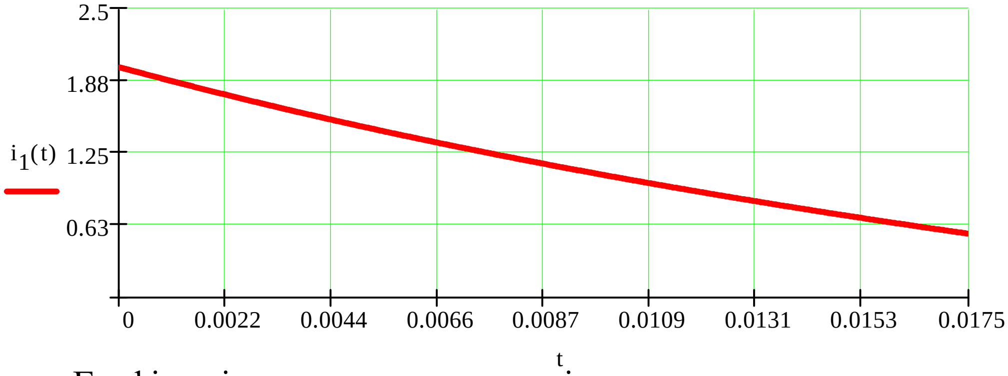
$i_2(t) \ \Big| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \rightarrow 8.75 \cdot 10^{-6} + 1.50 \cdot \exp(-57.1 \cdot t) - 1.00 \cdot \exp(-57.1 \cdot t + 1.)$

Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

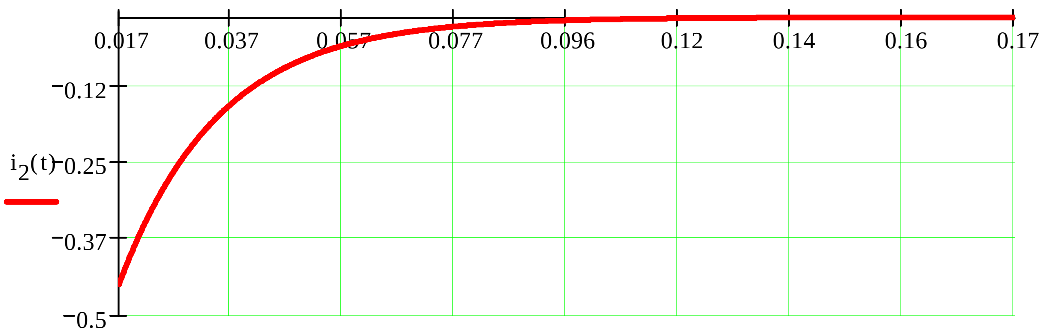
$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \ \rightarrow 75.00 - 75.00 \cdot \exp(-57.14 \cdot t) - 1429. \cdot t$

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

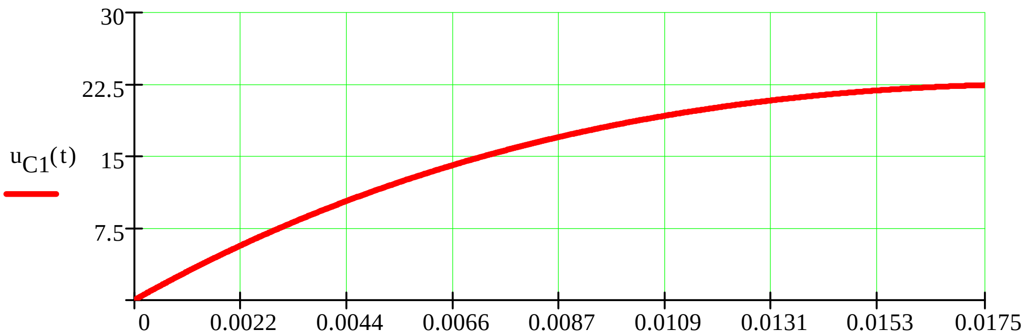
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$