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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 204

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.

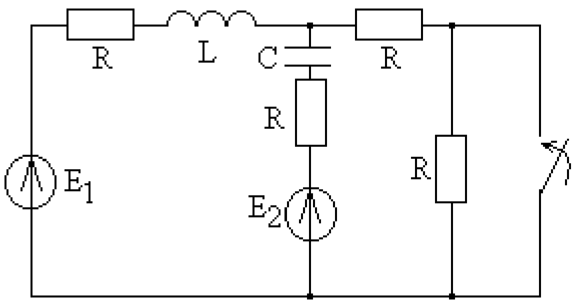
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

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 реактивному 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

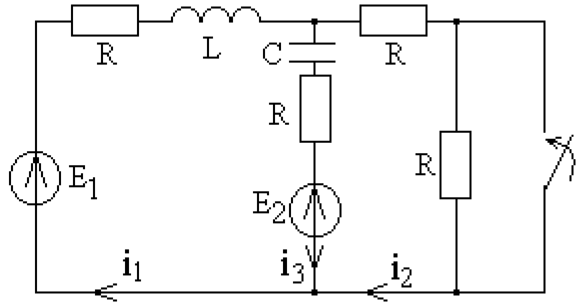
Вхідні данні:

$L := 0.1$ Гн $C := 100 \cdot 10^{-6}$ 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: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 0.667$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - E_2 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = -13.333$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = -30$

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк}$ $\quad i_{10} = 0.667$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad u_{C0} = -13.333$

Залежні початкові умови

Given

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

$E_1 - E_2 = u_{L0} + u_{C0} + i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R$

$E_2 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 6 \rightarrow \begin{pmatrix} -.333333 \\ 1. \\ 16.6667 \end{pmatrix}$$

$i_{30} = -0.333$ $\quad i_{20} = 1$ $\quad u_{L0} = 16.667$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{10} = 166.667$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = -3.333 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

$0 = du_{L0} + du_{C0} + di_{30} \cdot R + di_{10} \cdot R$

$0 = di_{20} \cdot R - di_{30} \cdot R - du_{C0}$

$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$ $\quad di_{20} = 50 \quad di_{30} = 116.667 \quad du_{L0} = -1.083 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$Z(p) := \dfrac{R \cdot \left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right)}{2 \cdot R + \dfrac{1}{p \cdot C}} + p \cdot L + R \qquad Z(p) := \dfrac{R \cdot \left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (p \cdot L + R)}{2 \cdot R + \dfrac{1}{p \cdot C}}$

$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (p \cdot L + R) \ \Bigg|\begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -708.95 \\ -141.05 \end{pmatrix}$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -708.95 \qquad p_2 = -141.05$

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

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

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

$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A_1, A_2) \qquad A_1 = -0.211 \qquad A_2 = -0.123$

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

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

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)\ \mathrm{float}, 7 \ \rightarrow 1. - .2106891 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - .1226442 \cdot \exp(-141.05 \cdot$ $i_1(0) = 0.667$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2) \qquad B_1 = -0.088 \qquad B_2 = 0.088$

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

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

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)$ float, 7 $\rightarrow 1. - 8.804402 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 8.804402 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-141.05$ $i_2(0) = 1$

Given

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

$di_{30} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2$ $\qquad di_{30} = 116.667$

$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2)$ $\qquad C_1 = -0.123 \qquad C_2 = -0.211$

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

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

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ float, 7 $\rightarrow -.1226451 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - .2106879 \cdot \exp(-141.05 \cdot t)$ $i_3(0) = -0.333$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2)$ $\qquad D_1 = 1.73 \qquad D_2 = 14.937$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)$ float, 7 $\rightarrow -30. + 1.730052 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 14.93661 \cdot \exp(-$ $u_C(0) = -13.333$

Given

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

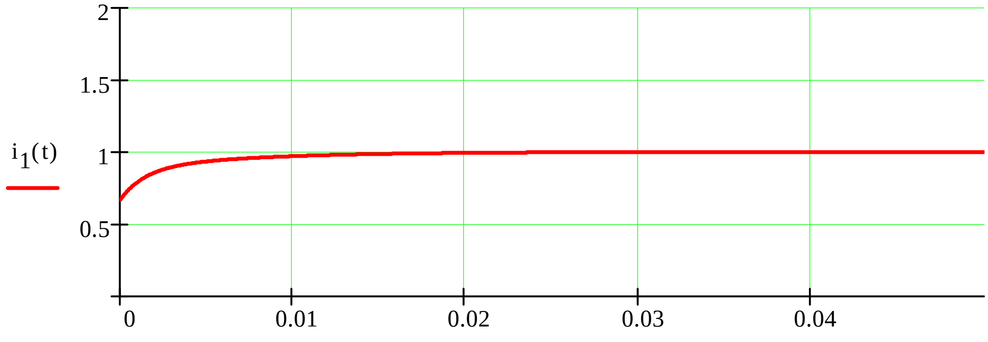
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2)$ $\qquad F_1 = 14.937 \qquad F_2 = 1.73$

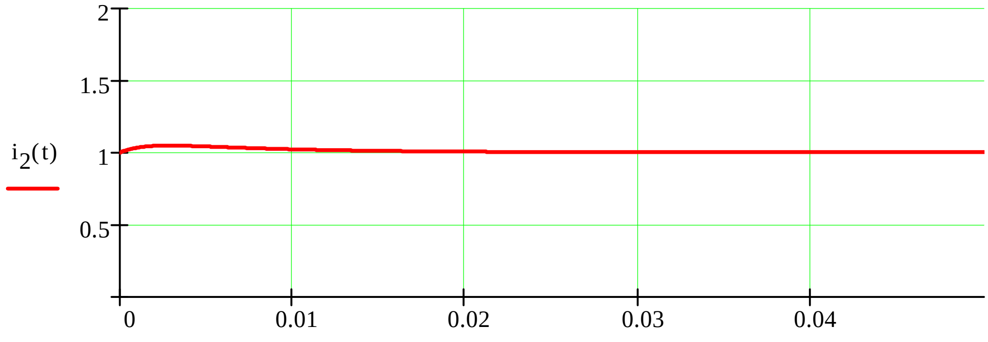
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

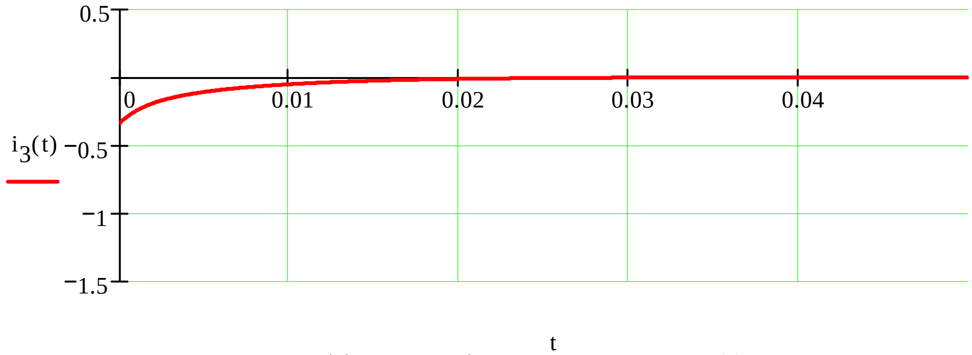
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)$ float, 7 $\rightarrow 14.93665 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 1.730053 \cdot \exp(-141.$ $u_L(0) = 16.667$



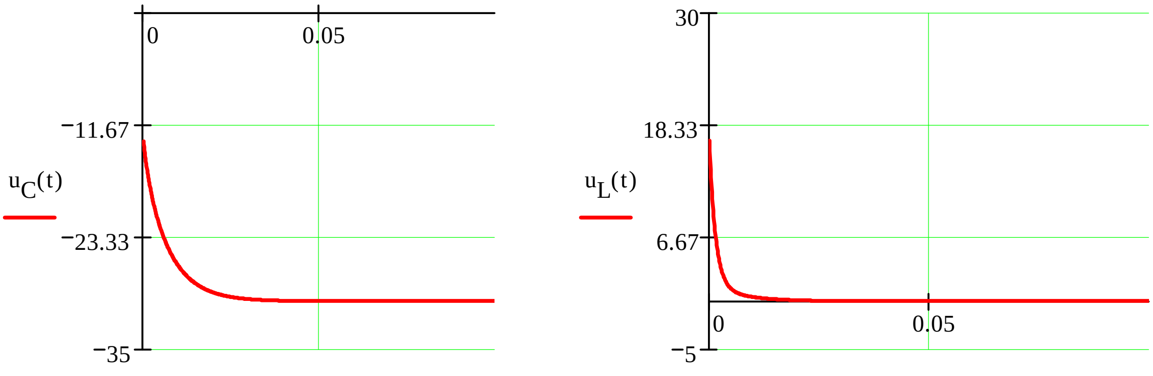
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

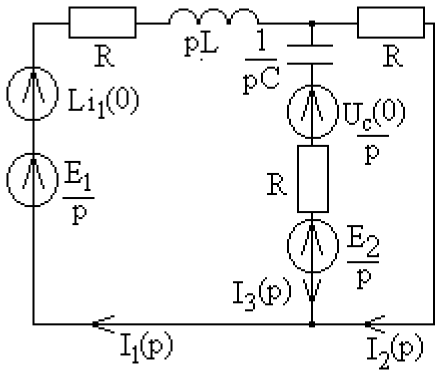


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0.667$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - E_2 - i_{1дк} \cdot R \quad u_{Cдк} = -13.333$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк} \quad i_{L0} = 0.667$

$u_{C0} = -13.333$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R\right) - I_{k2}(p) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + I_{k2}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R\right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p}$$

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \; \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(10.0 \cdot p^{2.} + 8500.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \; \rightarrow \frac{\left(7333.3 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 6.6667 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} \\ -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}\right|$$

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \; \rightarrow \frac{\left(10.000 \cdot p^{2.} + 9000.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(7333.3\cdot p + 1.0000\cdot 10^6 + 6.6667\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(10.0\cdot p^{2.} + 8500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(10.000\cdot p^{2.} + 9000.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)}{p^{1.}\cdot\left(10.0\cdot p^{2.} + 8500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)^{1.}}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p\cdot C}$$

$$u_C(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{float},5\\ \text{factor}\end{array}\right. \rightarrow \frac{-1}{1000\cdot p}\cdot\frac{\left(14666350\cdot p + 3000000000 + 13333\cdot p^2\right)}{\left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_{k1}(p) - L\cdot i_{1дк}$$

$$u_L(p)\ \text{factor}\ \rightarrow \frac{50}{3}\cdot\frac{(p+200)}{\left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := \left(7333.3\cdot p + 1.0000\cdot 10^6 + 6.6667\cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(10.0\cdot p^{2.} + 8500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -708.95\\ -141.05\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -708.95 \qquad p_2 = -141.05$

$N_1(p_0) = 1\times 10^6 \qquad N_1(p_1) = -8.482\times 10^5 \qquad N_1(p_2) = 9.827\times 10^4$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \text{factor}\ \rightarrow 10\cdot(p+500)\cdot(3\cdot p+200)$$

$dM_1(p_0) = 1\times 10^6 \qquad dM_1(p_1) = 4.026\times 10^6 \qquad dM_1(p_2) = -8.01\times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad i_1(0) = 0.667$$

$$i_1(t)\ \left|\begin{array}{l}\text{float},5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow 1.0000 - .21067\cdot\exp(-708.95\cdot t) - .12269\cdot\exp(-141.05\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := \frac{-1}{1000}\cdot\left(14666350\cdot p + 3000000000 + 13333\cdot p^2\right) \quad M_u(p) := p\cdot\left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_u(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -141.05\\ -708.95\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -141.05 \qquad p_2 = -708.95$

$N_u(p_0) = -3\times10^6$ $N_u(p_1) = -1.197\times10^6$ $N_u(p_2) = 6.964\times10^5$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp}M_u(p) \text{ factor } \rightarrow (p+500)\cdot(3\cdot p+200)$$

$dM_u(p_0) = 1\times10^5$ $dM_u(p_1) = -8.01\times10^4$ $dM_u(p_2) = 4.026\times10^5$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = -13.332$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -30. + 14.939\cdot\exp(-141.05\cdot t) + 1.7297\cdot\exp(-708.95\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{50}{3}\cdot(p+200) \qquad M_L(p) := \left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -141.05 \\ -708.95 \end{pmatrix} \qquad p_1 = -141.05 \qquad p_2 = -708.95$$

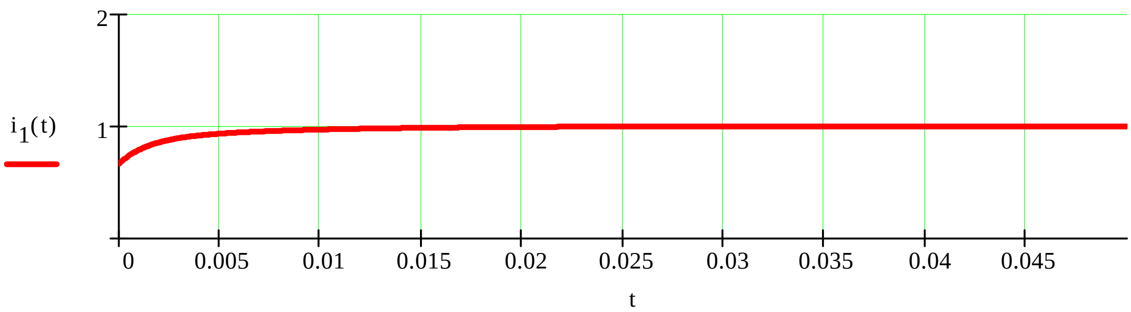
$N_L(p_1) = 982.5$ $N_L(p_2) = -8.483\times10^3$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 850 + 2\cdot p$$

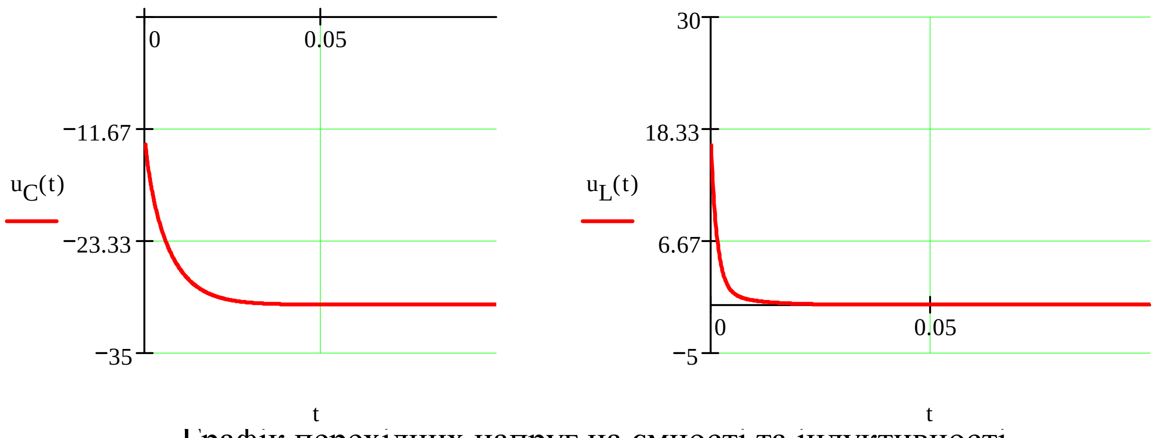
$dM_L(p_1) = 567.9$ $dM_L(p_2) = -567.9$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_L(0) = 16.667$$



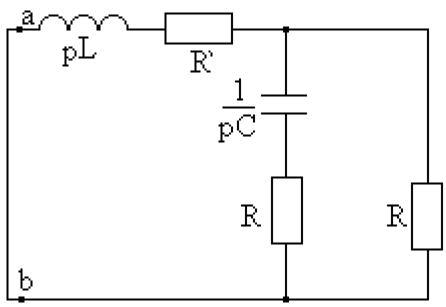
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$D = 0$

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

$$R' := \left(2\cdot R\cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right)^2 - 4\cdot(2\cdot R\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, R'\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-46.623\\ 16.623\end{pmatrix}$$

$R'_{1,0} = 16.623$

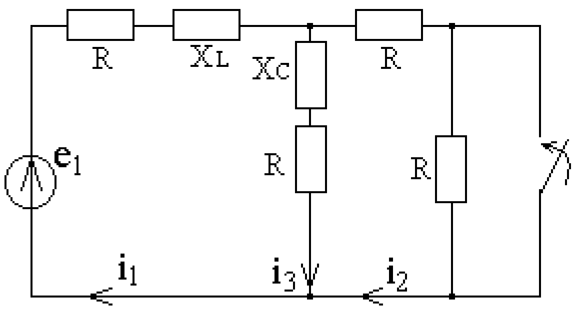
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $\qquad$ $X_C = 100$ $\qquad$ $X_L := \omega\cdot L$ $\qquad$ $X_L = 10$

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

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

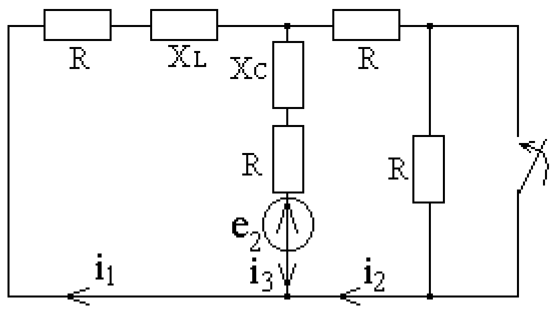


$Z'_{vx} := R + i\cdot X_L + \frac{2\cdot R\cdot(R - i\cdot X_C)}{2\cdot R + R - i\cdot X_C}$ $\qquad$ $Z'_{vx} = 103.846 - 20.769i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad$ $I'_{1дк} = 0.709 + 0.623i$ $\qquad$ $F(I'_{1дк}) = (0.944\ \ 41.31)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(R - i\cdot X_C)}{2\cdot R + R - i\cdot X_C}$ $\qquad$ $I'_{2дк} = 0.574 + 0.117i$ $\qquad$ $F(I'_{2дк}) = (0.586\ \ 11.565)$

$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$ $\qquad$ $I'_{3дк} = 0.136 + 0.506i$ $\qquad$ $F(I'_{3дк}) = (0.524\ \ 75)$



$$Z''_{vx} := R - X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad Z''_{vx} = 83.628 - 95.575i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = 0.122 + 0.618i \qquad F(I''_{3дк}) = (0.63 \;\; 78.814)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{(2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad I''_{1дк} = 0.108 + 0.405i \qquad F(I''_{1дк}) = (0.419 \;\; 75)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = 0.014 + 0.213i \qquad F(I''_{2дк}) = (0.214 \;\; 86.31)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 0.818 + 1.028i \qquad F(I_{1дк}) = (1.314 \;\; 51.501)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.587 + 0.331i \qquad F(I_{2дк}) = (0.674 \;\; 29.37)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 0.013 - 0.112i \qquad F(I_{3дк}) = (0.113 \;\; -83.199)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = -11.203 - 1.336i \qquad F(u_{Cдк}) = (11.283 \;\; -173.199)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -10.281 + 8.177i \qquad F(u_{Lдк}) = (13.136 \;\; 141.501)$$

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

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

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

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

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

i

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -1.89$

$i_{Lдк}(0) = 1.454$

Given

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

$$e_1(0) - e_2(0) = u_{L0} + i_{10} \cdot R + u_{C0} + i_{30} \cdot R$$

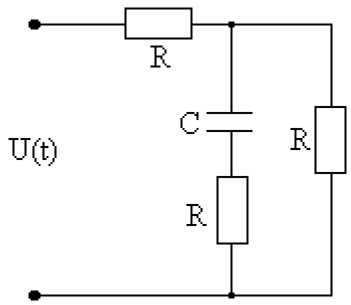
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$$

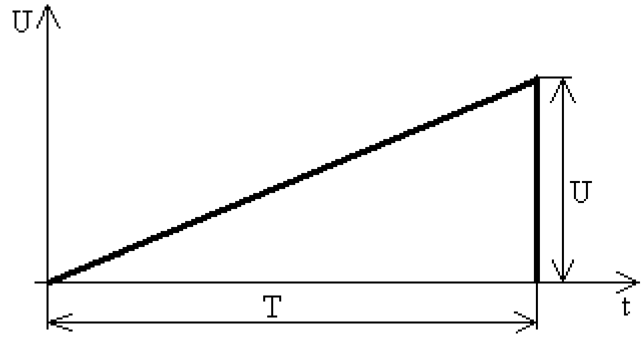
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 1.454$ $\quad i_{20} = 1.274$ $\quad i_{30} = 0.18$ $\quad u_{L0} = -65.674$ $\quad u_{C0} = -1.89$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

$u_{Cдк} := 0$ $u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

Незалежні початкові умови

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

$E = i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R + u_{C0}$

$0 = -u_{C0} + i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R$

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

$i_{10} = 0.013$ $i_{20} = 6.667 \times 10^{-3}$ $i_{30} = 6.667 \times 10^{-3}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$$Z_{vx}(p) := R + \frac{R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right)}{2R + \frac{1}{p \cdot C}} \qquad Zvx(p) := \frac{R \cdot \left(2R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right)}{2R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$p := R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right) \;\Big|\; \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -133.33 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 7.5 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$p = -133.33$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

$i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = 3.333 \times 10^{-3}$

$B_1 := i_{20} - i'_2 \qquad B_1 = 6.667 \times 10^{-3}$

Отже вільна складова струму i1(t) та i2(t) будуть мати вигляд:

$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p \cdot t} \qquad i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Повні значення цих струмів:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad i_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \qquad i_2(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$

$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float}, 5 \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 0 \qquad U_0 = 0$

$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 13333. \cdot t \qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 13333. \qquad U'_2 := 0$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow 133. \cdot t + .333 - .333 \cdot \exp(-133. \cdot t)$

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

$i_2(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow -.333 \cdot \exp(-133. \cdot t)$

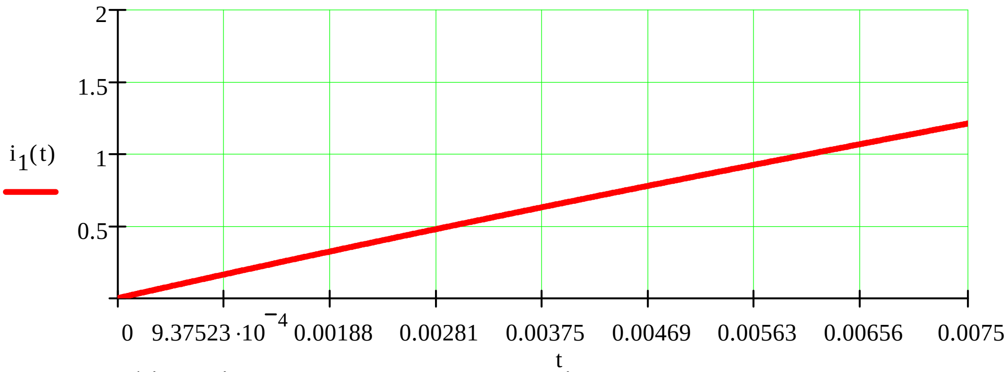
$i_1(0.5) = 66.998 \qquad i_2(1.5) = 0$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

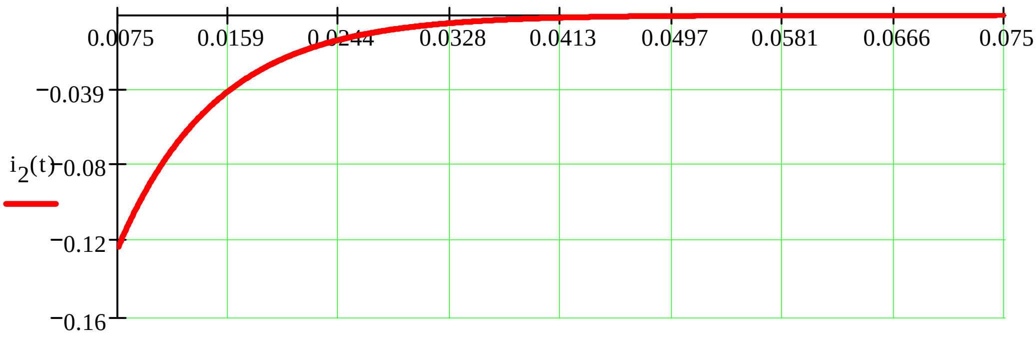
$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \rightarrow 6667. \cdot t - 50. + 50. \cdot \exp(-133.3 \cdot t)$

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

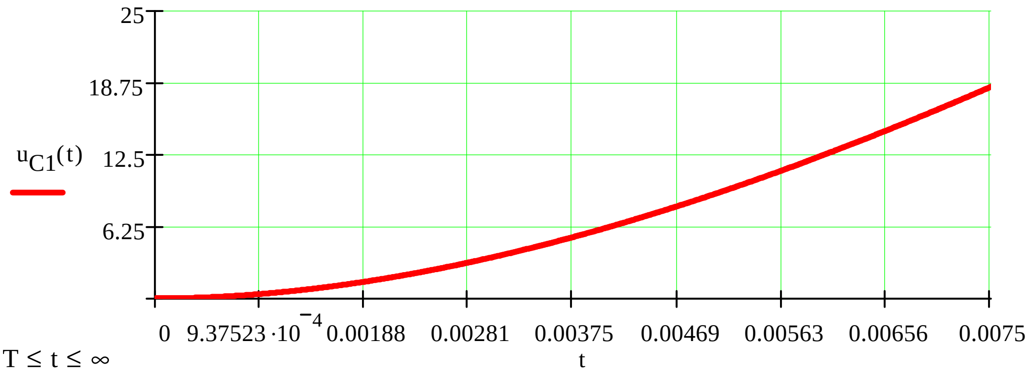
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$