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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“

Варіант № 420

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.

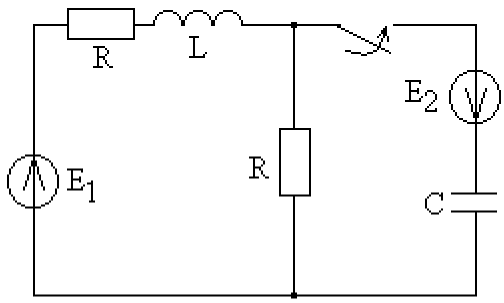
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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.



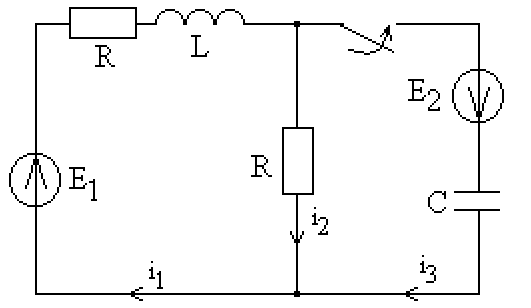
Вхідні данні:

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

$E_1 := 80$ В $E_2 := 130$ В $\psi := 135 \cdot deg$ С^0 $\omega := 150$ с$^{-1}$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1}{2R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 0.8$ $\quad i_{3дк} := 0$

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2R}$ $\quad i'_2 := i'_1$ $\quad i'_2 = 0.8$ $\quad i'_3 := 0$

$u'_L := 0$ $\quad u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 170$

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк}$ $\quad i_{10} = 0.8$

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

Залежні початкові умови

Given

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

$E_1 = u_{L0} + i_{20} \cdot R + i_{10} \cdot R$

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

$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$ $\quad i_{30} = 3.4$ $\quad i_{20} = -2.6$ $\quad u_{L0} = 170$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{10} = 1.133 \times 10^3$ $\quad du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 4.857 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

$0 = du_{L0} + di_{20} \cdot R + di_{10} \cdot R$

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

$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$ $\quad di_{20} = 97.143$ $\quad di_{30} = 1.036 \times 10^3$ $\quad du_{L0} = -6.152 \times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) + (p\cdot L + R)\cdot\left(R+\frac{1}{p\cdot C}\right) \;\Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -297.98 \\ -63.922 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -297.98$ $\qquad\qquad$ $p_2 = -63.922$

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

$$i_{10} - i'_1 = A_1 + A_2$$
$$di_{10} - 0 = p_1\cdot A_1 + p_2\cdot A_2$$
$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \qquad A_1 = -4.842 \qquad A_2 = 4.842$$

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

$$i''_1(t) := A_1\cdot e^{p_1\cdot t} + A_2\cdot e^{p_2\cdot t} \text{ float}, 5 \rightarrow -4.8421\cdot\exp(-297.98\cdot t) + 4.8421\cdot\exp(-63.922\cdot t)$$
$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .80000 - 4.8421\cdot\exp(-297.98\cdot t) + 4.8421\cdot\exp(-63.922\cdot t) \qquad i_1(0) = 0.8$$

Given

$$i_{20} - i'_2 = B_1 + B_2$$
$$di_{20} - 0 = p_1\cdot B_1 + p_2\cdot B_2$$
$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \qquad B_1 = 0.514 \qquad B_2 = -3.914$$

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

$$i''_2(t) := B_1\cdot e^{p_1\cdot t} + B_2\cdot e^{p_2\cdot t} \text{ float}, 5 \rightarrow .51351\cdot\exp(-297.98\cdot t) - 3.9135\cdot\exp(-63.922\cdot t)$$
$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .80000 + .51351\cdot\exp(-297.98\cdot t) - 3.9135\cdot\exp(-63.922\cdot t) \qquad i_2(0) = -2.6$$

Given

$$i_{30} - i'_3 = C_1 + C_2$$
$$di_{30} - 0 = p_1\cdot C_1 + p_2\cdot C_2$$
$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \qquad C_1 = -5.356 \qquad C_2 = 8.756$$

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 $\rightarrow -5.3556 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 8.7556 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ float, 5 $\rightarrow -5.3556 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 8.7556 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_3(0) = 3.4$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2)$ $\qquad D_1 = 25.676 \qquad D_2 = -195.676$

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 $\rightarrow 25.6757 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 195.676 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)$ float, 5 $\rightarrow 170. + 25.676 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 195.68 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

Given

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

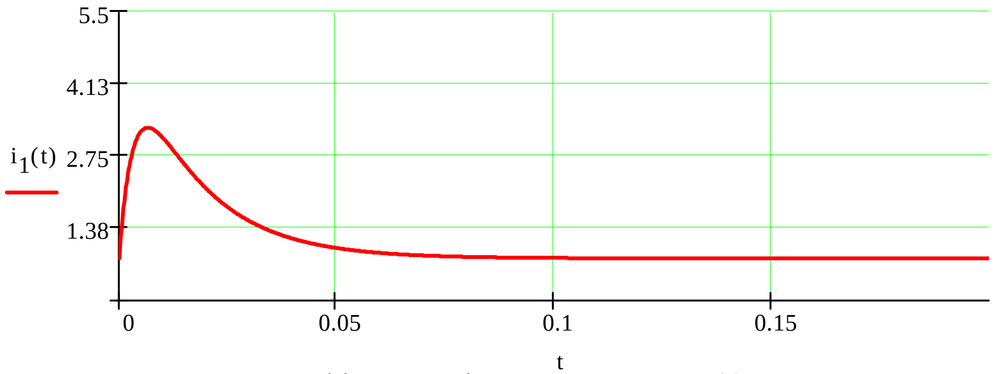
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2)$ $\qquad F_1 = 216.43 \qquad F_2 = -46.43$

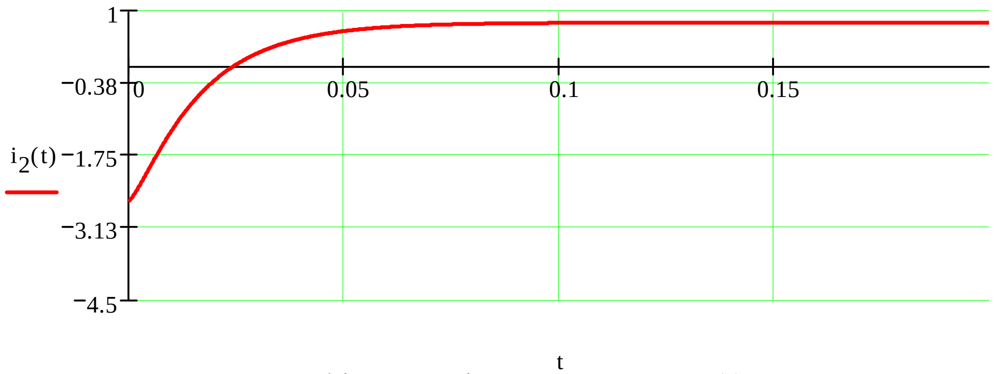
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + F_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow 216.43 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 46.430 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

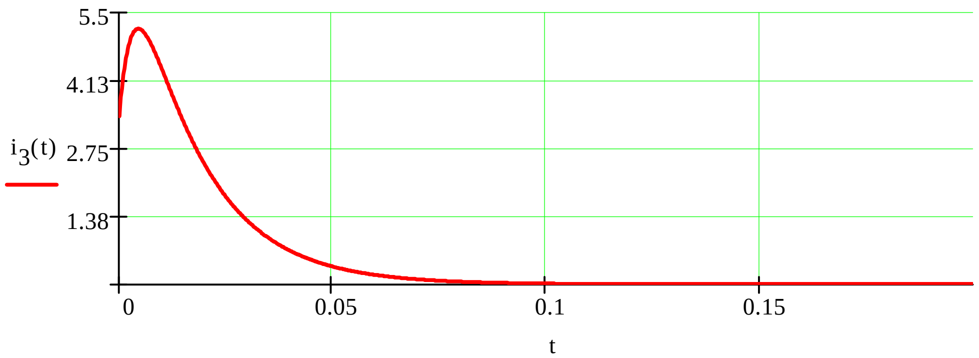
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)$ float, 5 $\rightarrow 216.43 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 46.430 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad u_L(0) = 170$



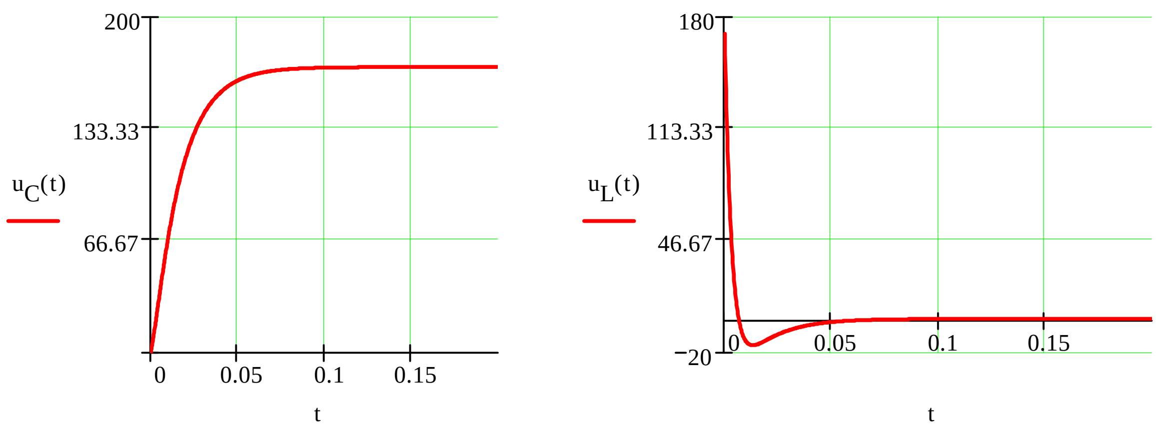
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

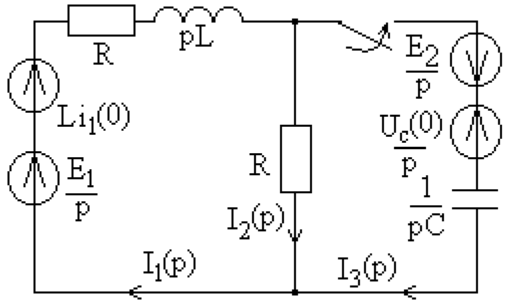


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 0.8$ $\quad i_{3дк} := 0$

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

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк}$ $\quad i_{L0} = 0.8$

$u_{C0} = 0$

$$I_{k1}(p)\cdot(2R + p\cdot L) - I_{k2}(p)\cdot(R) = \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0}$$

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

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

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0} & -(R) \\ \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \frac{\left(10671.\cdot p + 1.1429\cdot 10^5 + 6.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} 2R + p\cdot L & \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0} \\ -(R) & \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \frac{(17000. + 25.500\cdot p)}{p^{1.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \frac{\left(10671.\cdot p + 1.1429\cdot 10^5 + 6.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(2714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_3(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \frac{(17000. + 25.500\cdot p)}{\left(2714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_2(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \;\Big|\; \begin{array}{l}\text{float}, 5 \\ \text{simplify}\end{array} \rightarrow -5.\cdot\frac{\left(12658.\cdot p - 228580. + 39.\cdot p^2\right)}{p\cdot\left(27143.\cdot p + 1428600. + 75.\cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_{k1}(p) - L \cdot i_{1дк} \text{ factor } \rightarrow 3570 \cdot \frac{p}{\left(400000 + 7600 \cdot p + 21 \cdot p^2\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p \cdot C} \text{ factor } \rightarrow \frac{850000}{7} \cdot \frac{(2000 + 3 \cdot p)}{\left(27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2\right) \cdot p}$$

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

$N_1(p) := 10671. \cdot p + 1.1429 \cdot 10^5 + 6.0000 \cdot p^{2.}$ $\qquad M_1(p) := p \cdot \left(2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^{2.}\right)$

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

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -350 - 278.39i \qquad p_2 = -63.923$

$N_1(p_0) = 1.143 \times 10^5 \qquad N_1(p_1) = -3.351 \times 10^6 - 1.801i \times 10^6 \qquad N_1(p_2) = -5.433 \times 10^5$

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

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 0.8$$

$$i_1(t) \,\Big|\, \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow .80001 - 4.8420 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 4.8418 \cdot \exp(-63.923 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$N_u(p) := \frac{850000}{7} \cdot (2000 + 3 \cdot p)$ $\qquad M_u(p) := p \cdot \left(27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2\right)$

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

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

$N_u(p_0) = 2.429 \times 10^8 \qquad N_u(p_1) = 2.196 \times 10^8 \qquad N_u(p_2) = 1.343 \times 10^8$

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

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

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = -0.012$$

$$u_C(t) \,\Big|\, \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow 170.00 - 195.69 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) + 25.677 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := 3570p$ $\qquad$ $M_L(p) := 400000 + 7600 \cdot p + 21 \cdot p^2$

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

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

$N_L(p_1) = -2.282 \times 10^5$ $\qquad$ $N_L(p_2) = -1.064 \times 10^6$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 7600 + 42 \cdot p$$

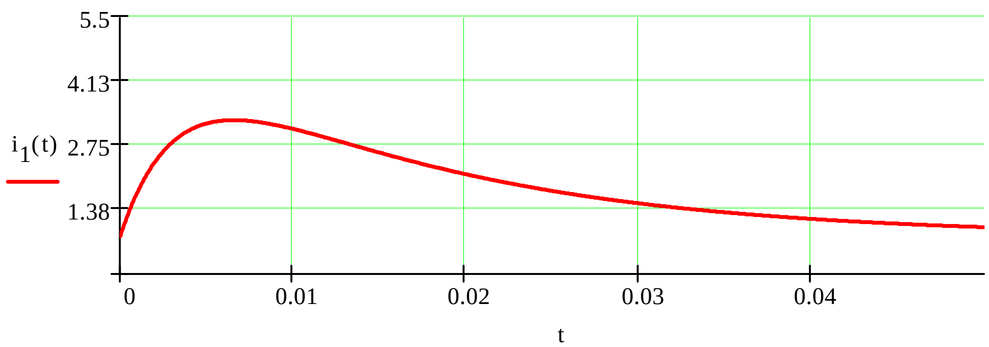
$dM_L(p_1) = 4.915 \times 10^3$ $\qquad$ $dM_L(p_2) = -4.915 \times 10^3$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

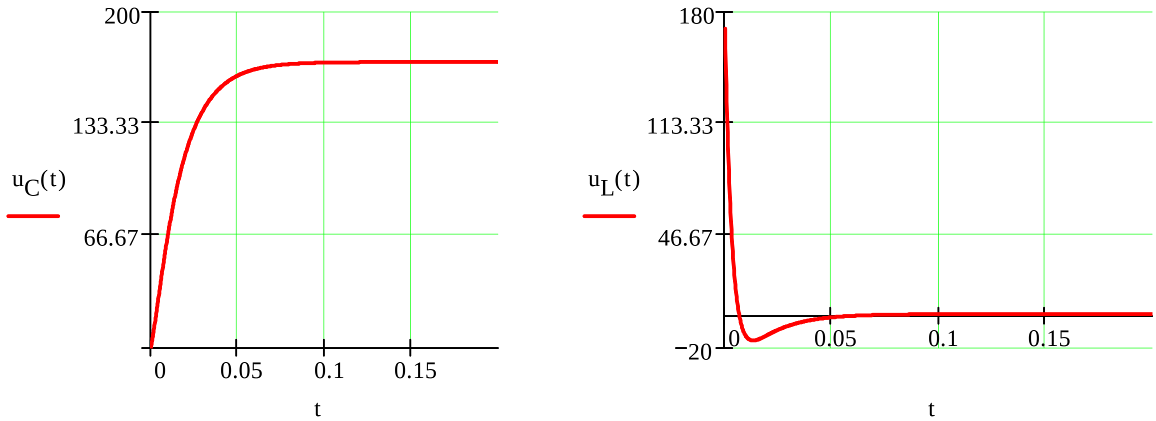
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t}$$

$u_L(0) = 170.005$

$$u_L(t) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5 \\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow -46.425 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) + 216.43 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$

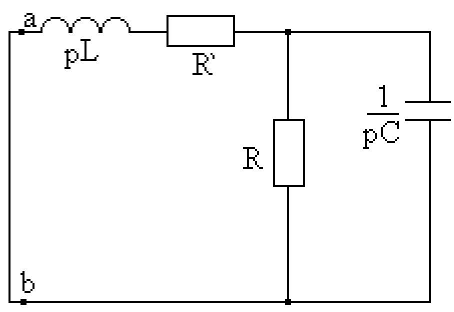


Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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



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

$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right) \cdot (R' + p \cdot L) + \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R}$$

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

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \ \Bigg|\begin{array}{l} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{array} \rightarrow \begin{pmatrix} -24.991 \\ 33.563 \end{pmatrix}$$

В схемі з данними параметрами перехід з аперіодичного процесу у коливальний буде при: $R' := 33.563$

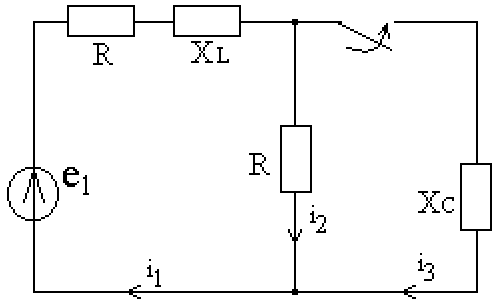
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 9.524 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 22.5$$

$$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_1 = -56.569 + 56.569i \qquad F(E_1) = (80 \ \ 135)$$

$$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_2 = -91.924 + 91.924i \qquad F(E_2) = (130 \ \ 135)$$

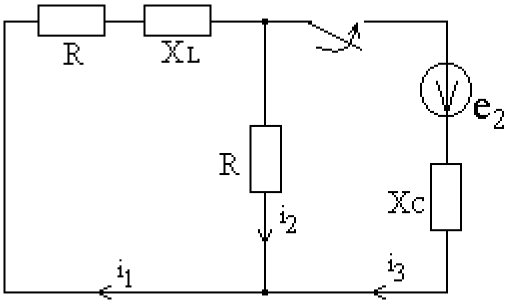


$$Z'_{vx} := i \cdot X_L + R + \frac{R \cdot (-X_C \cdot i)}{R - X_C \cdot i} \qquad Z'_{vx} = 51.751 + 13.31i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = -0.762 + 1.289i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.497 \ \ 120.577)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{-X_C \cdot i}{R - X_C \cdot i} \qquad I'_{2дк} = 0.21 + 0.185i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.28 \ \ 41.361)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = -0.972 + 1.104i \qquad F(I'_{3дк}) = (1.471 \ \ 131.361)$$



$$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(i \cdot X_L + R) \cdot R}{2R + i \cdot X_L} \qquad Z''_{vx} = 26.205 - 4.17i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = -3.966 + 2.877i \qquad F(I''_{3дк}) = (4.899 \quad 144.041)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{R}{2R + i \cdot X_L} \qquad I''_{1дк} = -1.579 + 1.794i \qquad F(I''_{1дк}) = (2.39 \quad 131.361)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = -2.386 + 1.083i \qquad F(I''_{2дк}) = (2.621 \quad 155.589)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = -2.341 + 3.083i \qquad F(I_{1дк}) = (3.871 \quad 127.211)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = -2.176 + 1.268i \qquad F(I_{2дк}) = (2.519 \quad 149.768)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 2.994 - 1.773i \qquad F(I_{3дк}) = (3.479 \quad -30.635)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = -16.886 - 28.513i \qquad F(u_{Cдк}) = (33.138 \quad -120.635)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -69.362 - 52.669i \qquad F(u_{Lдк}) = (87.092 \quad -142.789)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -40.323$

$i_{Lдк}(0) = 4.36$

Given

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

$$e_1(0) = u_{L0} + i_{10} \cdot R + i_{20} \cdot R$$

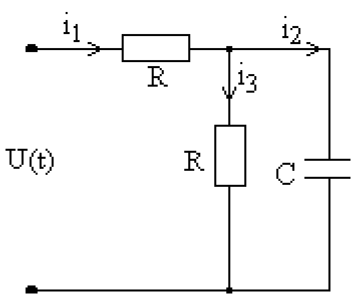
$$e_2(0) = -i_{20} \cdot 2 \cdot R + u_{C0}$$

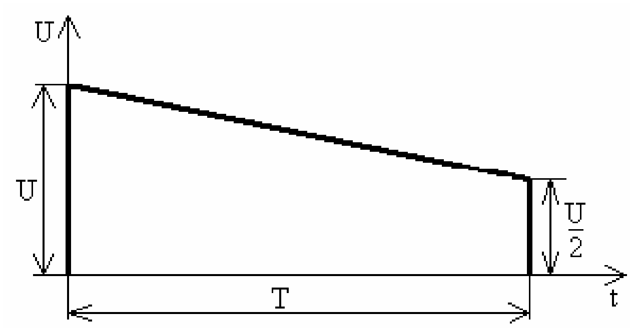
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 4.36$ $\quad i_{20} = -1.703$ $\quad i_{30} = 6.063$ $\quad u_{L0} = -52.821$ $\quad u_{C0} = -40.323$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.0$ $\quad E_1 := 80$ $\quad E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

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

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

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

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

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:

$$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 80$$

$$U_1(t) := U_0 - \frac{E_1}{2T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 80. - 2285.7 \cdot t \qquad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow -2285.7$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t-\tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \ \Big| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \rightarrow .400 + 1.20 \cdot \exp(-57.1 \cdot t) - 22.9 \cdot t$$

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

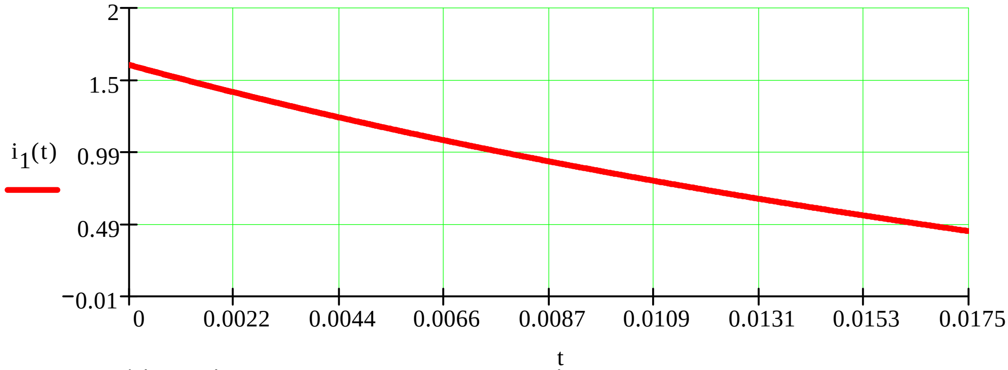
$$i_2(t) \ \Big| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \rightarrow 3.50 \cdot 10^{-6} + 1.20 \cdot \exp(-57.1 \cdot t) - .800 \cdot \exp(-57.1 \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

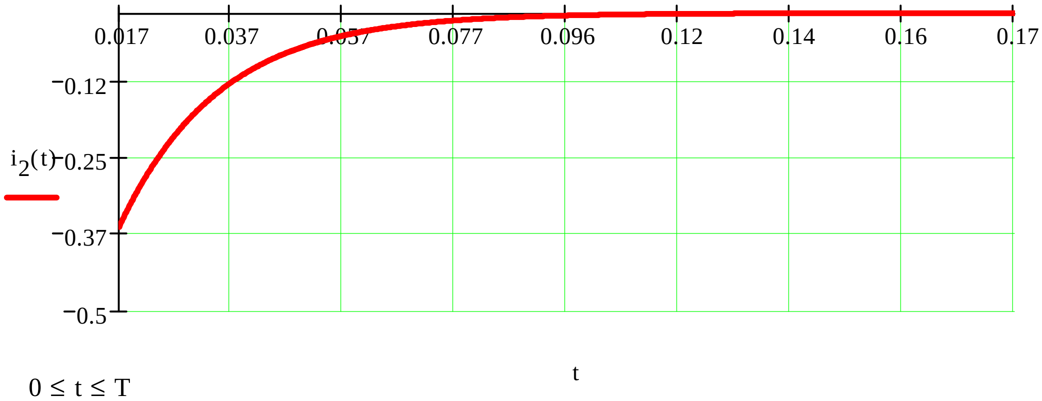
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t-\tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \ \rightarrow 60.00 - 60.00 \cdot \exp(-57.14 \cdot t) - 1143. \cdot t$$

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

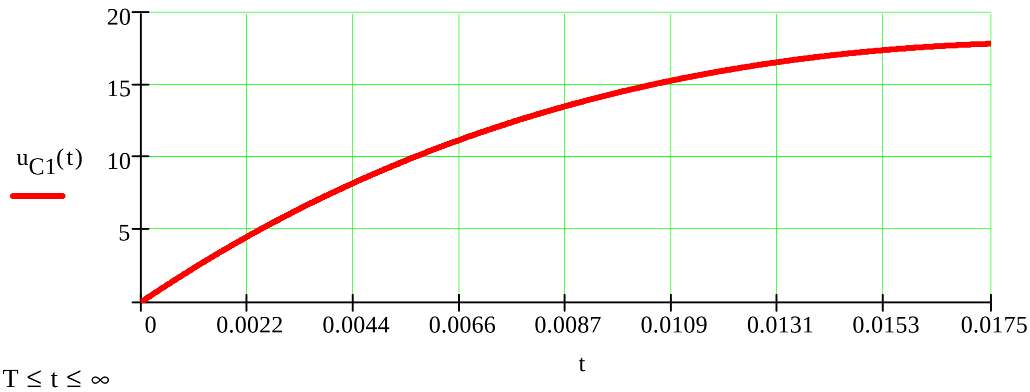
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$