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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 417

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.

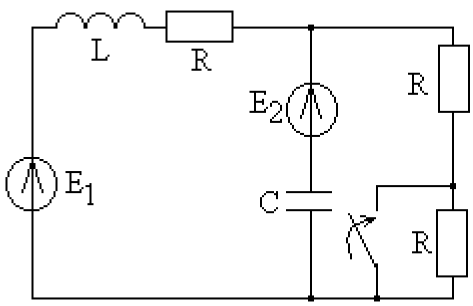
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

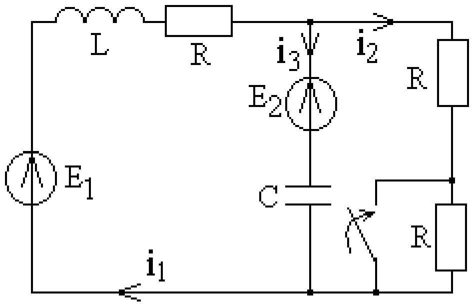
Вхідні данні:

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

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

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0.6$

$i_{3дк} := 0 \quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R - E_2 \quad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 0.9$

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

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

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк} \quad i_{10} = 0.6$

$u_{C0} := u_{Cдк} \quad u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 6 \rightarrow \begin{pmatrix} -.600000 \\ 1.20000 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i_{30} = -0.6 \quad i_{20} = 1.2 \quad u_{L0} = 0$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = 0$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = -857.143$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$ $\qquad di_{20} = -17.143 \qquad di_{30} = 17.143 \qquad du_{L0} = 857.143$

Вільний режим після комутайії: $\quad t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

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

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

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

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

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

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

$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A_1, A_2) \qquad A_1 = 0.082 \qquad A_2 = -0.382$

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 $\rightarrow 8.1931 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .38193 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ float, 5 $\rightarrow .90000 + 8.1931 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .38193 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \qquad i_1(0) = 0.6$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2) \qquad B_1 = -8.689 \times 10^{-3} \qquad B_2 = 0.309$

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 $\rightarrow -8.6891 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + .30869 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)$ float, 5 $\rightarrow .90000 - 8.6891 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + .30869 \cdot \exp(-63.922 \cdot t$ $i_2(0) = 1.2$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2)$ $\qquad C_1 = 0.091 \qquad C_2 = -0.691$

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 $\rightarrow 9.0620 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .69062 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ float, 5 $\rightarrow 9.0620 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .69062 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_3(0) = -0.6$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2)$ $\qquad D_1 = -0.434 \qquad D_2 = 15.434$

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 $\rightarrow -.434453 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 15.4345 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)$ float, 5 $\rightarrow -15. - .43445 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 15.435 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

Given

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

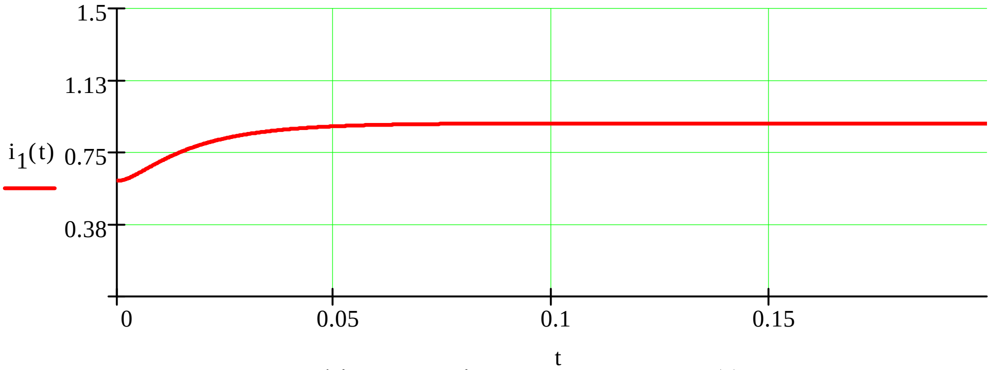
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2)$ $\qquad F_1 = -3.662 \qquad F_2 = 3.662$

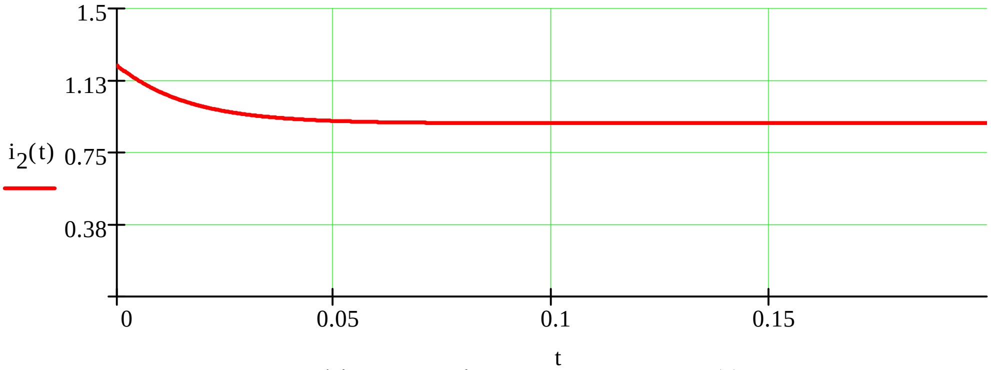
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + F_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -3.6621 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 3.6621 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

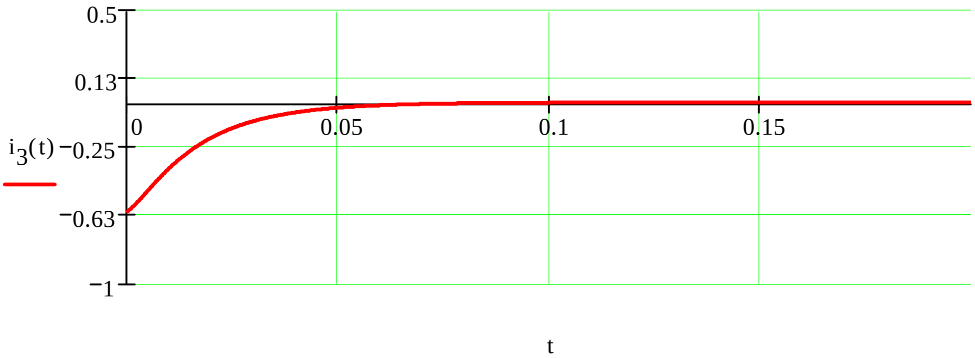
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)$ float, 5 $\rightarrow -3.6621 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 3.6621 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad u_L(0) = 0$



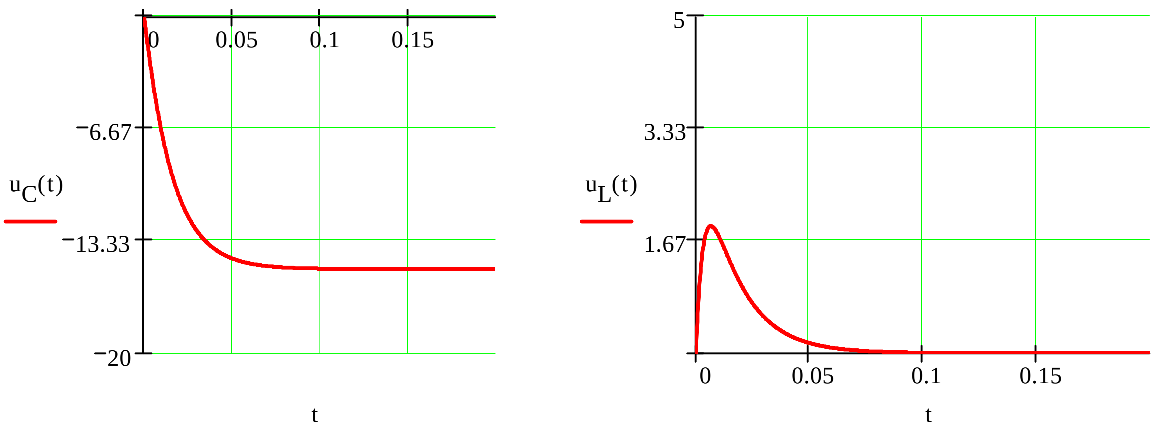
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

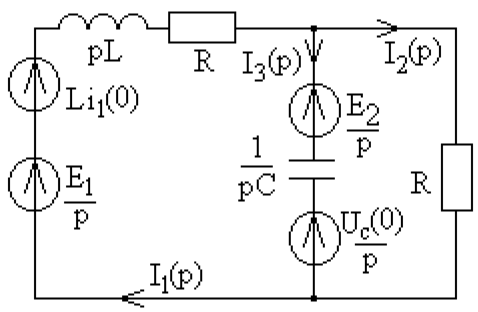


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

<u>Операторний метод</u>



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1}{3 \cdot R}$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0.6$

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R - E_2$ $\qquad u_{Cдк} = 0$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк}$ $\qquad i_{L0} = 0.6$

$u_{C0} = 0$

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

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

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

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \dfrac{E_1}{p} - \dfrac{E_2}{p} - \dfrac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) \\ \dfrac{E_2}{p} + \dfrac{u_{C0}}{p} & \dfrac{1}{p \cdot C} + R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(1628.6 \cdot p + 1.2857 \cdot 10^5 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \dfrac{1}{p \cdot C} & \dfrac{E_1}{p} - \dfrac{E_2}{p} - \dfrac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} \\ -\left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) & \dfrac{E_2}{p} + \dfrac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(3128.6 \cdot p + 9.00 \cdot p^{2.} + 1.2857 \cdot 10^5\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(1628.6 \cdot p + 1.2857 \cdot 10^5 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(3128.6 \cdot p + 9.00 \cdot p^{2.} + 1.2857 \cdot 10^5\right)}{p^{1.} \cdot \left(2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{factor} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-21429}{p} \cdot \frac{(1000 + 3 \cdot p)}{\left(27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2\right)}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{18000}{\left(400000 + 7600 \cdot p + 21 \cdot p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := \left(1628.6 \cdot p + 1.2857 \cdot 10^5 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p^{1.} \cdot \left(2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

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

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

$N_1(p_0) = 1.286 \times 10^5$ $\qquad N_1(p_1) = 4.284 \times 10^4$ $\qquad N_1(p_2) = 4.285 \times 10^4$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{27143}{5} \cdot p + 142860 + \frac{45}{2} \cdot p^2$$

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 0.6$$

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow .89997 + 8.1909 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .38188 \cdot \exp(-63.923 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := -21429 \cdot (1000 + 3 \cdot p) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2\right)$$

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

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

$N_u(p_0) = -2.143 \times 10^7$ $\qquad N_u(p_1) = -1.732 \times 10^7$ $\qquad N_u(p_2) = -2.273 \times 10^6$

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

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

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 1.138 \times 10^{-3}$$

$$u_C(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow -15. + 15.436 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) - .43451 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 18000 \qquad M_L(p) := \left(400000 + 7600 \cdot p + 21 \cdot p^2\right)$$

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

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

$$N_L(p_1) = 1.8 \times 10^4 \qquad N_L(p_2) = 1.8 \times 10^4$$

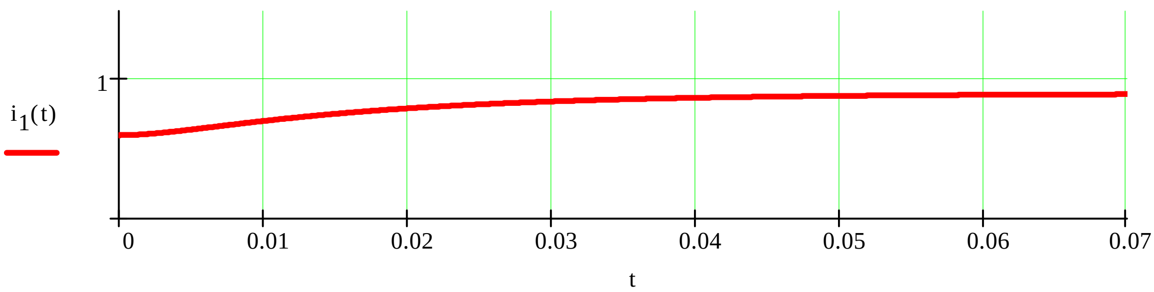
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 7600 + 42 \cdot p$$

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

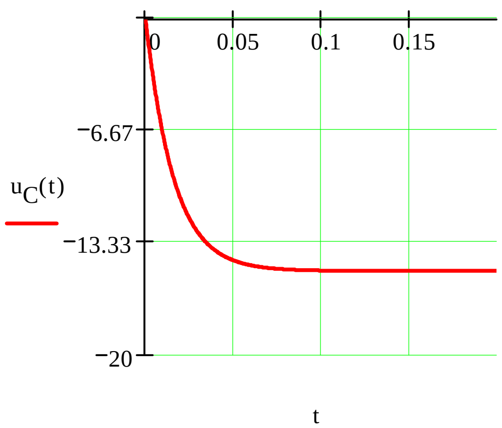
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

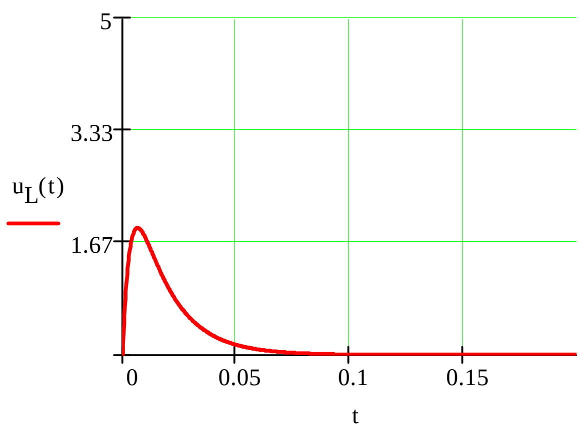
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = -1.49 \times 10^{-4}$$

$$u_L(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow 3.6620 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) - 3.6621 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$



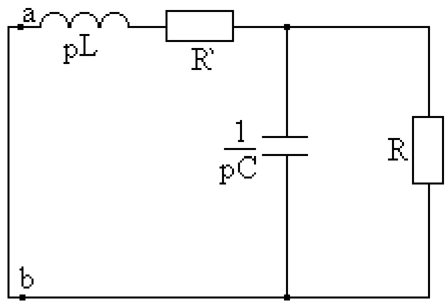
Графік перехідного струму i1(t).





Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС Е1 щоб перехідний процес переходив в граничний режим

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



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

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

$D = 0$

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C}+\frac{R}{C}\right) \left|\begin{matrix}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}-24.991 \\ 33.563\end{pmatrix} \qquad R' := 33.563$$

Отже при такому значенні активного опору у вітці з джерелом напруги Е1 аперіодичний процес перейде в коливальний.

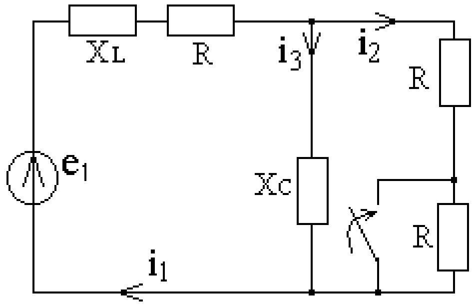
Визначити струми в вітках та напруги на реактивних елементах в момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійних ЕДС Е1і Е2 в колі діють синусоїдні джерела.

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

$$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C} \qquad X_C = 7.143 \qquad X_L := \omega\cdot L \qquad X_L = 30$$

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

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

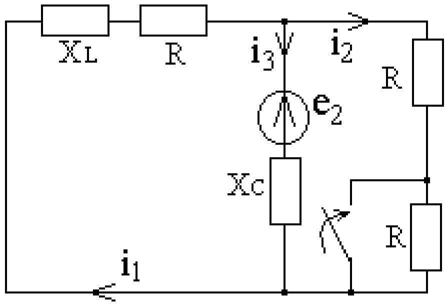


$$Z'_{vx} := R + i\cdot X_L + \frac{2\cdot R\cdot(i\cdot X_C)}{R+R-i\cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 49.492 + 37.107i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 1.44 + 0.206i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.455 \;\; 8.14)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{R+R-i\cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.022 - 0.101i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.104 \;\; -77.775)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{2\cdot R}{R+R-i\cdot X_C} \qquad I'_{3дк} = 1.418 + 0.307i \qquad F(I'_{3дк}) = (1.451 \;\; 12.225)$$



$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \dfrac{(R + i \cdot X_L) \cdot 2 \cdot R}{R + i \cdot X_L + R + R}$ $\quad Z''_{vx} = 35.897 + 5.678i$

$I''_{3дк} := \dfrac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\quad I''_{3дк} = 1.335 + 0.971i$ $\quad F(I''_{3дк}) = (1.651 \;\; 36.012)$

$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \dfrac{2 \cdot R}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R}$ $\quad I''_{1дк} = 0.98 + 0.451i$ $\quad F(I''_{1дк}) = (1.079 \;\; 24.702)$

$I''_{2дк} := I''_{3дк} \cdot \dfrac{R + i \cdot X_L}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R}$ $\quad I''_{3дк} = 1.335 + 0.971i$ $\quad F(I''_{3дк}) = (1.651 \;\; 36.012)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\quad I_{1дк} = 2.421 + 0.657i$ $\quad F(I_{1дк}) = (2.508 \;\; 15.185)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\quad I_{2дк} = 0.377 + 0.418i$ $\quad F(I_{2дк}) = (0.563 \;\; 47.984)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\quad I_{3дк} = 0.083 - 0.663i$ $\quad F(I_{3дк}) = (0.669 \;\; -82.873)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\quad u_{Cдк} = -4.738 - 0.592i$ $\quad F(u_{Cдк}) = (4.775 \;\; -172.873)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\quad u_{Lдк} = -19.71 + 72.623i$ $\quad F(u_{Lдк}) = (75.25 \;\; 105.185)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -0.838$

$i_{Lдк}(0) = 0.929$

Given

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

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

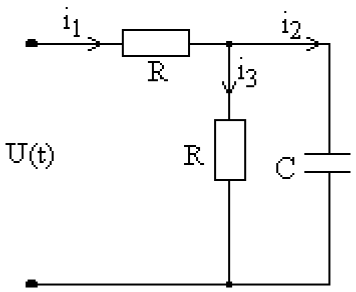
$e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0}$

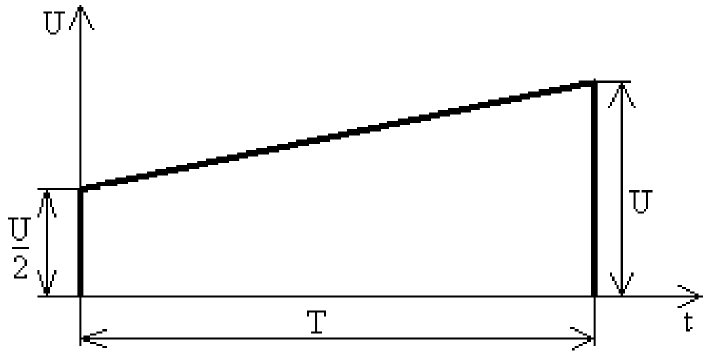
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 0.929$ $\quad i_{20} = 1.183$ $\quad i_{30} = -0.254$ $\quad u_{L0} = -15.62$ $\quad u_{C0} = -0.838$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

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

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \;\Big|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -57.143 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 0.016$$

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

Повні значення цих струмів:

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

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

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 0 \qquad U_0 = 0$

$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 5714.3 \cdot t \qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 5714.3$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \,\Big|\, \begin{matrix}\text{factor} \\ \text{float}, 3\end{matrix} \rightarrow 57.1 \cdot t + 1. - 1. \cdot \exp(-57.1 \cdot t)$

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

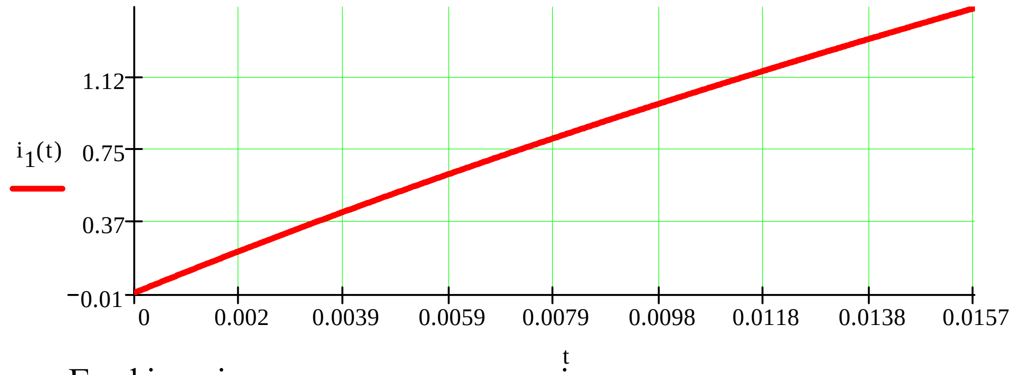
$i_2(t) \,\Big|\, \begin{matrix}\text{factor} \\ \text{float}, 3\end{matrix} \rightarrow 1.00 \cdot 10^{-20} + .100 \cdot \exp(-57.1 \cdot t + .900) - 1. \cdot \exp(-57.1 \cdot t)$

Напруга на індуктивністі на цих проміжках буде мати вигляд:

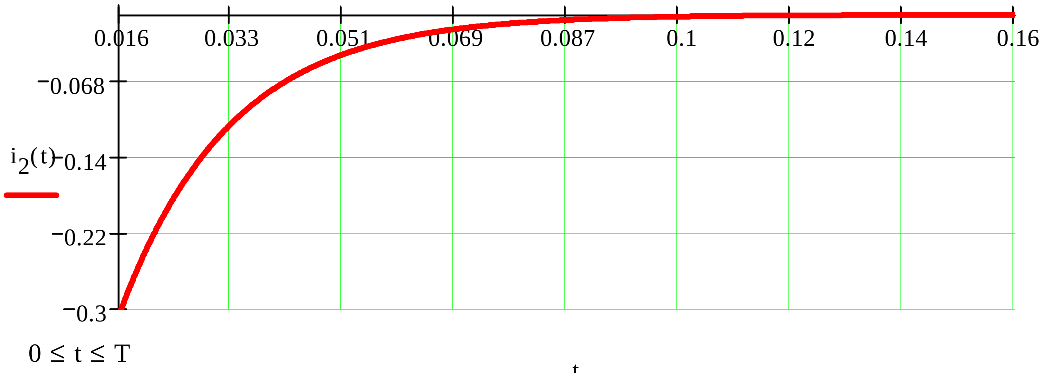
$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \rightarrow 2857. \cdot t - 50. + 50. \cdot \exp(-57.14 \cdot t)$

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

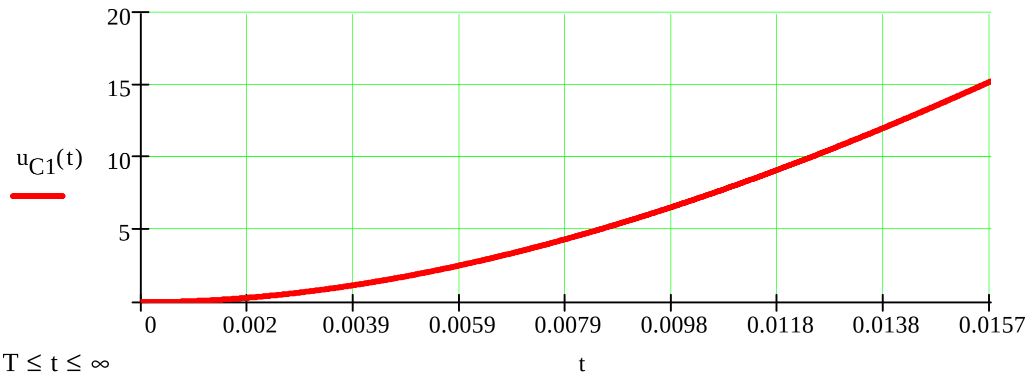
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$