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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 806

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.

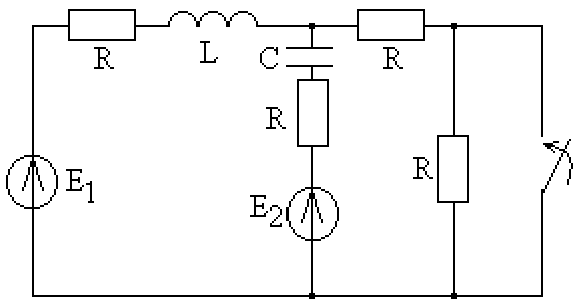
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

    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 реактивному 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

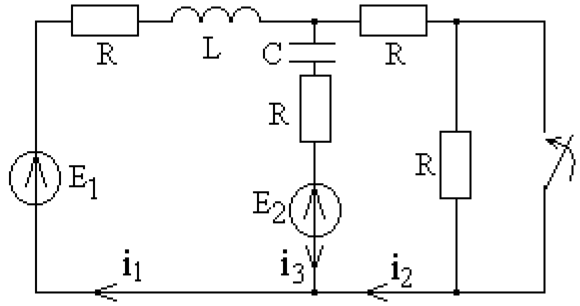
Вхідні данні:

$L := 0.2$ Гн $\quad C := 180 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 50$ Ом

$E_1 := 100$ В $\quad E_2 := 80$ В $\quad \psi := 30 \cdot deg$ C^0 $\quad \omega := 100$ 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

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

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

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

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

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

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = 83.333$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = -1.852 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(di_{20}, di_{30}, du_{L0}\right)$$

$di_{20} = 23.148$ $\quad di_{30} = 60.185$ $\quad du_{L0} = -5.324 \times 10^{3}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (p \cdot L + R) \ \Bigg|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -351.54 \\ -79.018 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -351.54$ $\qquad p_2 = -79.018$

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

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

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

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

$A_1 = -0.209$ $\qquad A_2 = -0.124$

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

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

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \text{float}, 7 \ \rightarrow 1. - .2091360 \cdot \exp(-351.54 \cdot t) - .1241973 \cdot \exp(-79.018 \cdot$ $\quad i_1(0) = 0.667$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2) \qquad B_1 = -0.085 \qquad B_2 = 0.085$$

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

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

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow 1. - 8.494085 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-351.54 \cdot t) + 8.494085 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-79.018 \qquad i_2(0) = 1$$

Given

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

$$di_{30} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2 \qquad di_{30} = 60.185$$

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2) \qquad C_1 = -0.124 \qquad C_2 = -0.209$$

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

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

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow -.1241953 \cdot \exp(-351.54 \cdot t) - .2091377 \cdot \exp(-79.018 \cdot t) \qquad i_3(0) = -0.333$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2) \qquad D_1 = 1.963 \qquad D_2 = 14.704$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow -30. + 1.962716 \cdot \exp(-351.54 \cdot t) + 14.70395 \cdot \exp(- \qquad u_C(0) = -13.333$$

Given

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

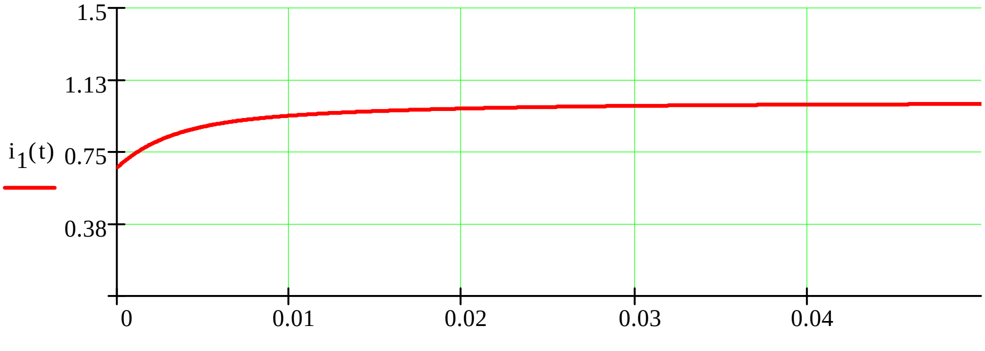
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2) \qquad F_1 = 14.704 \qquad F_2 = 1.963$$

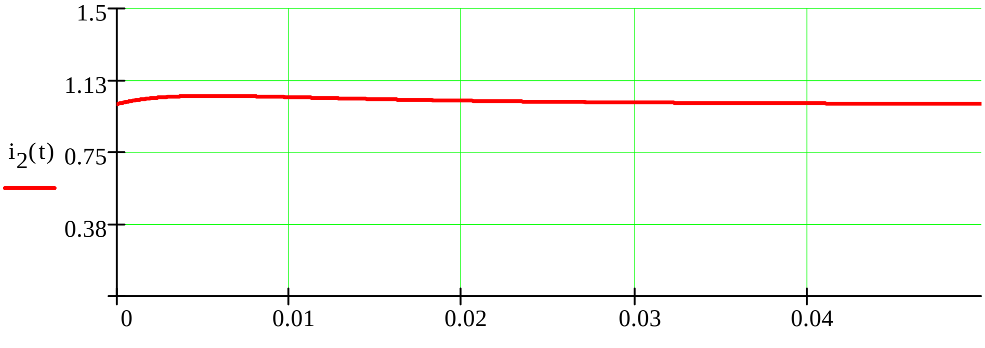
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

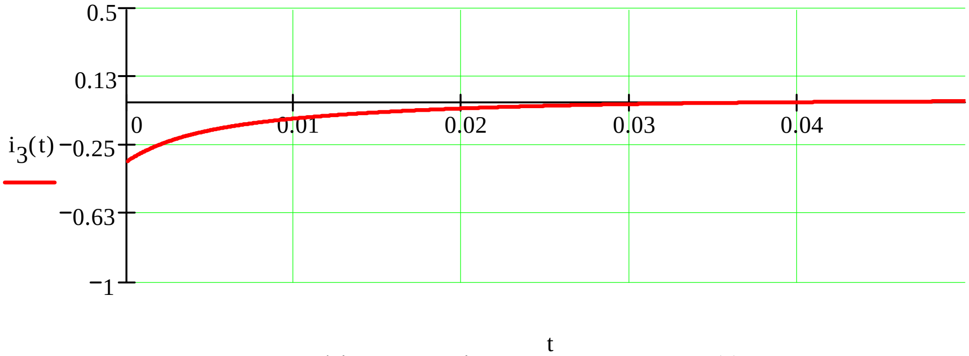
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow 14.70383 \cdot \exp(-351.54 \cdot t) + 1.962866 \cdot \exp(-79.0 \qquad u_L(0) = 16.667$$



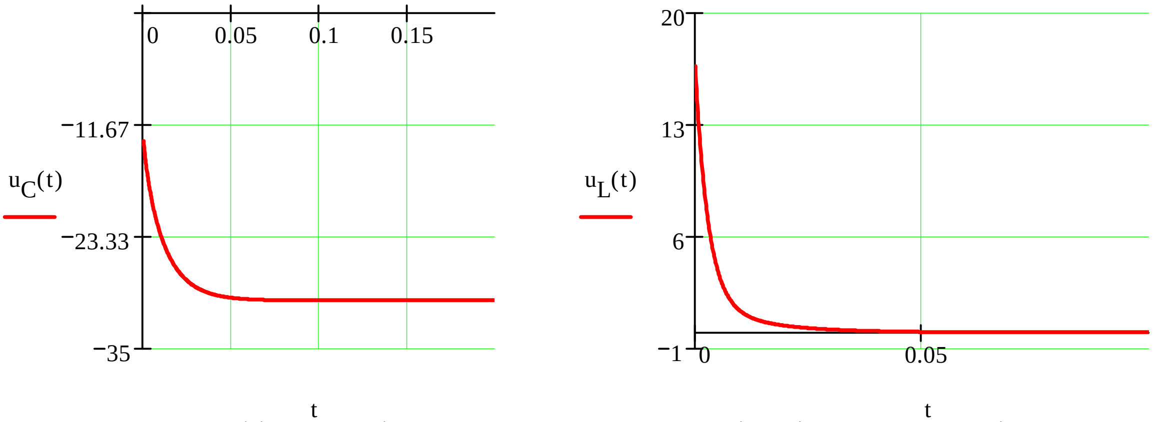
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

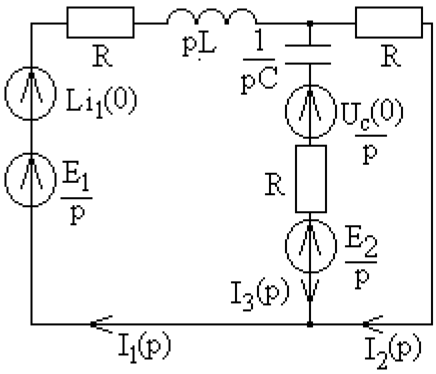


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

<u>Операторний метод</u>



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

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

Початкові умови:

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

$u_{C0} = -13.333$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float},5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(8611.1 \cdot p + 5.5556 \cdot 10^5 + 20.000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float},5 \ \rightarrow \frac{\left(7407.4 \cdot p + 5.5556 \cdot 10^5 + 13.333 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

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

$$\Delta_2(p) \text{ float},5 \ \rightarrow \frac{\left(9074.1 \cdot p + 20.000 \cdot p^{2.} + 5.5556 \cdot 10^5\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(7407.4\cdot p + 5.5556\cdot 10^5 + 13.333\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(8611.1\cdot p + 5.5556\cdot 10^5 + 20.000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(9074.1\cdot p + 20.000\cdot p^{2.} + 5.5556\cdot 10^5\right)}{p^{1.}\cdot\left(8611.1\cdot p + 5.5556\cdot 10^5 + 20.000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{factor}\end{matrix}\right. \rightarrow \frac{-1}{200\cdot p}\cdot\frac{\left(303701963\cdot p + 33333600000 + 533320\cdot p^2\right)}{\left(86111\cdot p + 5555600 + 200\cdot p^2\right)}$$

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

$$u_L(p)\ \text{factor}\ \rightarrow \frac{50}{3}\cdot\frac{(9\cdot p + 1000)}{\left(3875\cdot p + 250000 + 9\cdot p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := \left(7407.4\cdot p + 5.5556\cdot 10^5 + 13.333\cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p\cdot\left(8611.1\cdot p + 5.5556\cdot 10^5 + 20.000\cdot p^{2.}\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \left|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\-351.54\\-79.019\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\qquad p_1 = -351.54$ $\qquad p_2 = -79.019$

$N_1(p_0) = 5.556\times 10^5$ $\qquad N_1(p_1) = -4.007\times 10^5$ $\qquad N_1(p_2) = 5.349\times 10^4$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \text{factor}\ \rightarrow \frac{86111}{5}\cdot p + 555560 + 60\cdot p^2$$

$dM_1(p_0) = 5.556\times 10^5$ $\qquad dM_1(p_1) = 1.916\times 10^6$ $\qquad dM_1(p_2) = -4.307\times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow 1.0000 - .20914\cdot\exp(-351.54\cdot t) - .12419\cdot\exp(-79.019\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := \frac{-1}{200}\cdot\left(303701963\cdot p + 33333600000 + 533320\cdot p^2\right) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(86111\cdot p + 5555600 + 200\cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_u(p)\ \left|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\-79.02\\-351.54\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\qquad p_1 = -79.02$ $\qquad p_2 = -351.54$

$N_u(p_0) = -1.667 \times 10^8$ $\quad N_u(p_1) = -6.333 \times 10^7$ $\quad N_u(p_2) = 3.761 \times 10^7$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 172222 \cdot p + 5555600 + 600 \cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 5.556 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_1) = -4.307 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_2) = 1.916 \times 10^7$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = -13.334$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -30. + 14.703 \cdot \exp(-79.02 \cdot t) + 1.9628 \cdot \exp(-351.54 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{50}{3} \cdot (9 \cdot p + 1000) \qquad M_L(p) := \left(3875 \cdot p + 250000 + 9 \cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -79.02 \\ -351.54 \end{pmatrix} \qquad p_1 = -79.02 \qquad p_2 = -351.54$$

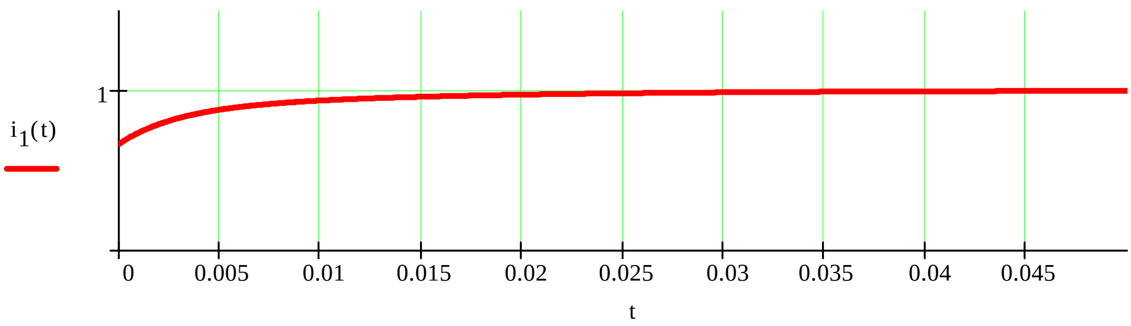
$N_L(p_1) = 4.814 \times 10^3$ $\quad N_L(p_2) = -3.606 \times 10^4$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 3875 + 18 \cdot p$$

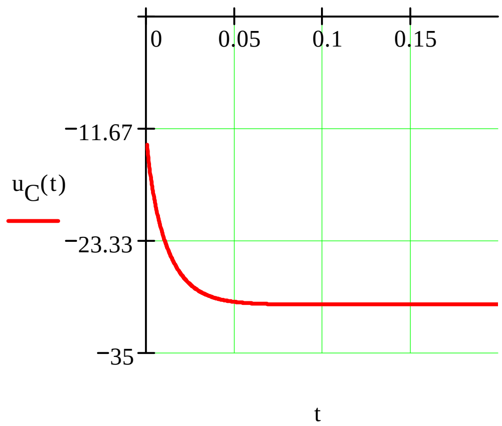
$dM_L(p_1) = 2.453 \times 10^3$ $\quad dM_L(p_2) = -2.453 \times 10^3$

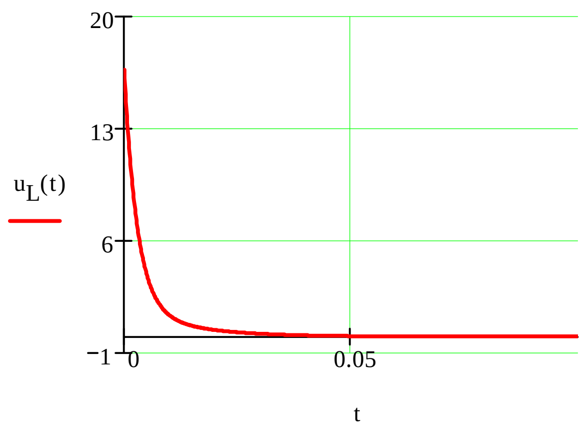
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 16.666$$



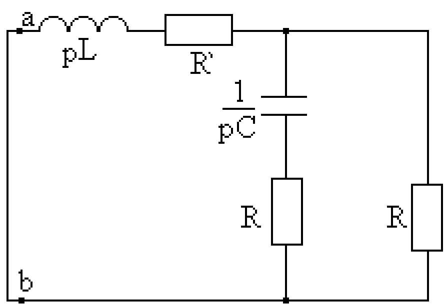
Графік перехідного струму i1(t).





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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$R' := \left(2 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right)^2 - 4 \cdot (2 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \,\Bigg|\, \begin{matrix} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -47.222 \\ 19.444 \end{pmatrix}$$

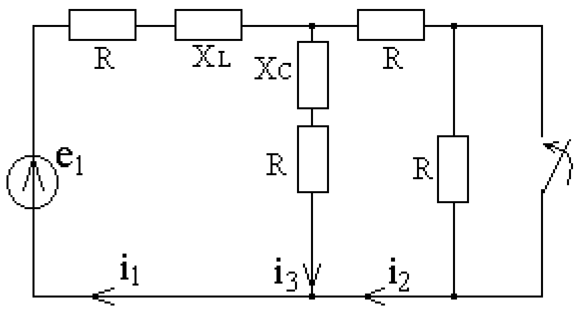
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 55.556 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 20$$

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

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

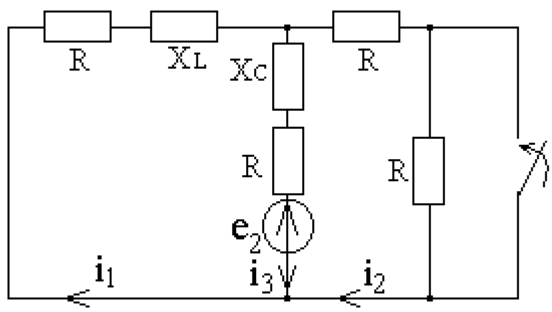


$$Z'_{vx} := R + i \cdot X_L + \frac{2 \cdot R \cdot (R - i \cdot X_C)}{2 \cdot R + R - i \cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 91.375 - 1.713i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.937 + 0.565i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.094 \;\; 31.074)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{(R - i \cdot X_C)}{2 \cdot R + R - i \cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.51 + 0.03i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.511 \;\; 3.384)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = 0.427 + 0.535i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.684 \;\; 51.397)$$



$$Z''_{vx} := R - X_C \cdot i + \frac{\left(R + i \cdot X_L\right) \cdot (2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad Z''_{vx} = 84.498 - 46.822i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = 0.427 + 0.71i \qquad F\left(I''_{3дк}\right) = (0.828\ \ 58.992)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{(2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad I''_{1дк} = 0.341 + 0.428i \qquad F\left(I''_{1дк}\right) = (0.547\ \ 51.397)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = 0.085 + 0.282i \qquad F\left(I''_{2дк}\right) = (0.295\ \ 73.198)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 1.279 + 0.992i \qquad F\left(I_{1дк}\right) = (1.619\ \ 37.818)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.596 + 0.312i \qquad F\left(I_{2дк}\right) = (0.672\ \ 27.671)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 1.739 \times 10^{-4} - 0.175i \qquad F\left(I_{3дк}\right) = (0.175\ \ -89.943)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot \left(-i \cdot X_C\right) \qquad u_{Cдк} = -9.734 - 9.663i \times 10^{-3} \qquad \left(u_{Cдк}\right) = (9.734\ \ -179.943)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -19.849 + 25.572i \qquad F\left(u_{Lдк}\right) = (32.371\ \ 127.818)$$

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

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

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

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

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

i

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -0.014$

$i_{Lдк}(0) = 1.404$

Given

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

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

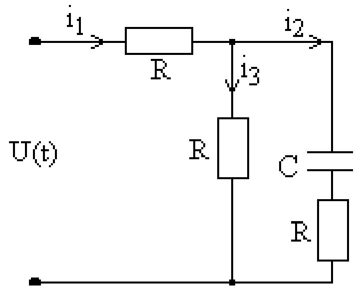
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$$

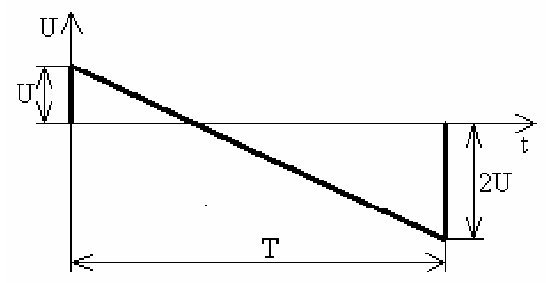
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{30}, i_{20}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 1.404$ $\qquad i_{20} = 1.267$ $\qquad i_{30} = 0.136$ $\qquad u_{L0} = -62.83$ $\qquad u_{C0} = -0.014$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

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

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot \left(R + R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right) \Bigg|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -74.074 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 0.014$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -74.074$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

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

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

Повні значення цих струмів:

$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad g_{11}(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-74.074 \cdot t)$

$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R+R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right)\ \text{float},5\ \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-74.074 \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \quad U_0 = 100$

$U_1(t) := U_0 - \frac{3E_1}{T} \cdot t \quad U_1(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 100. - 22222. \cdot t \quad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t)\ \text{float},5\ \rightarrow -22222.$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},3 \end{array} \right. \rightarrow 9.00 \cdot 10^{-6} + 1.33 \cdot \exp(-74.1 \cdot t) - 222. \cdot t$

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

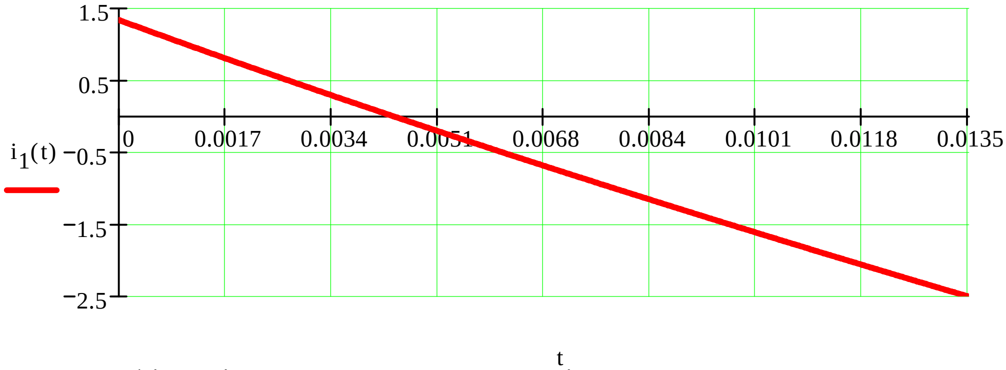
$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},3 \end{array} \right. \rightarrow 2.70 \cdot 10^{-5} + 1.33 \cdot \exp(-74.1 \cdot t) - .333 \cdot \exp(-74.1 \cdot t + 1.)$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

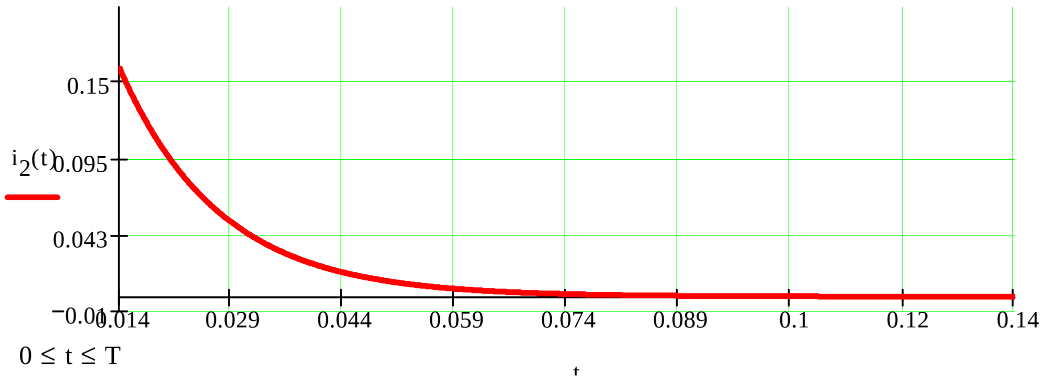
$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau\ \text{float},4\ \rightarrow 200.0 - 200.0 \cdot \exp(-74.07 \cdot t) - 1.111 \cdot 10^4 \cdot t$

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

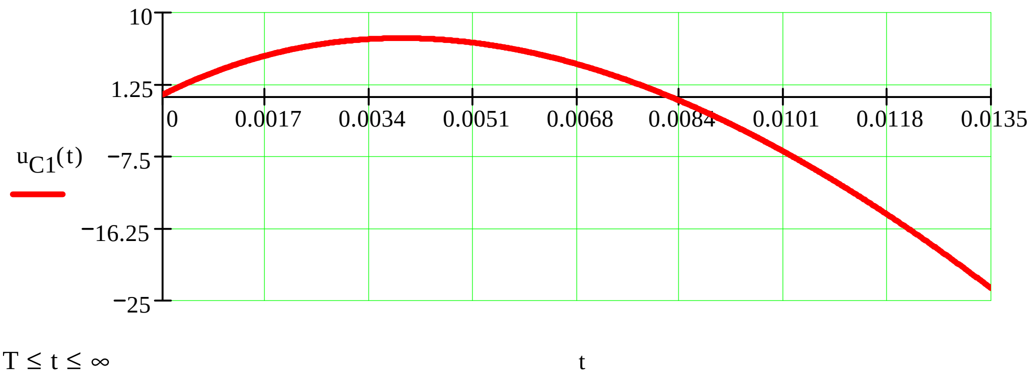
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$