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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“

Варіант № 214

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.

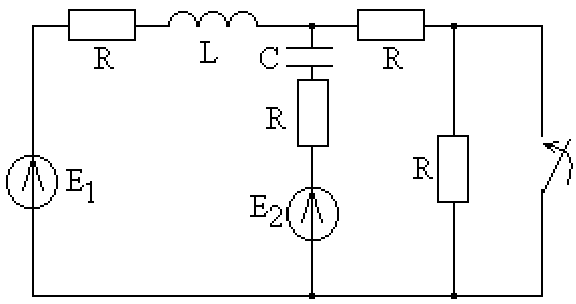
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

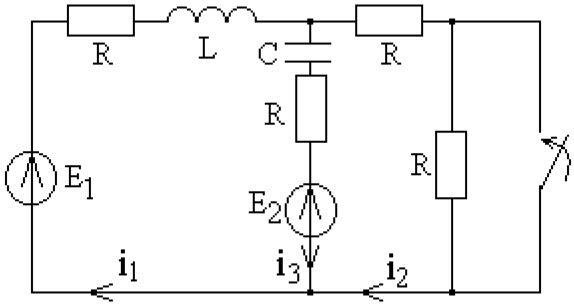
Вхідні данні:

$L := 0.1$ Гн $C := 100 \cdot 10^{-6}$ Ф $R := 50$ Ом

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

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0 \quad u_{Lдк} := 0$

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

Незалежні початкові умови

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

$u_{C0} := u_{Cдк} \quad u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 6 \rightarrow \begin{pmatrix} -.300000 \\ .900000 \\ 15. \end{pmatrix}$$

$i_{30} = -0.3 \quad i_{20} = 0.9 \quad u_{L0} = 15$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = 150$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{20} = 45$ $\quad di_{30} = 105$ $\quad du_{L0} = -9.75 \times 10^{3}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

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

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

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

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

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

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

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

$A_1 = -0.19$ $\quad A_2 = -0.11$

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

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

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ float, 7 $\rightarrow .9000000 - .1896197 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - .1103803 \cdot \exp(-1$ $i_1(0) = 0.6$

Given

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

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

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

$B_1 = -0.079$ $\quad B_2 = 0.079$

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

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

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 7 \rightarrow .9000000 - 7.923930 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 7.923930 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(- \quad i_2(0) = 0.9$

Given

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

$di_{30} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2 \qquad di_{30} = 105$

$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \qquad C_1 = -0.11 \qquad C_2 = -0.19$

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

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

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -.1103803 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - .1896197 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) \quad i_3(0) = -0.3$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \qquad D_1 = 1.557 \qquad D_2 = 13.443$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -15. + 1.557052 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 13.44295 \cdot \exp(- \quad u_C(0) = 2 \times 10^{-6}$

Given

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

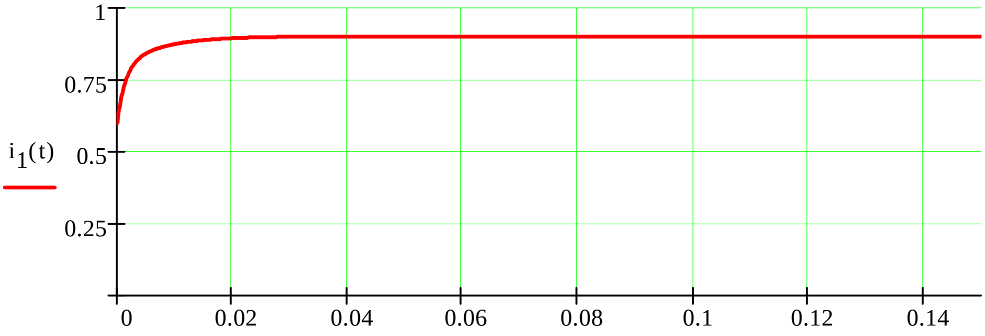
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \qquad F_1 = 13.443 \qquad F_2 = 1.557$

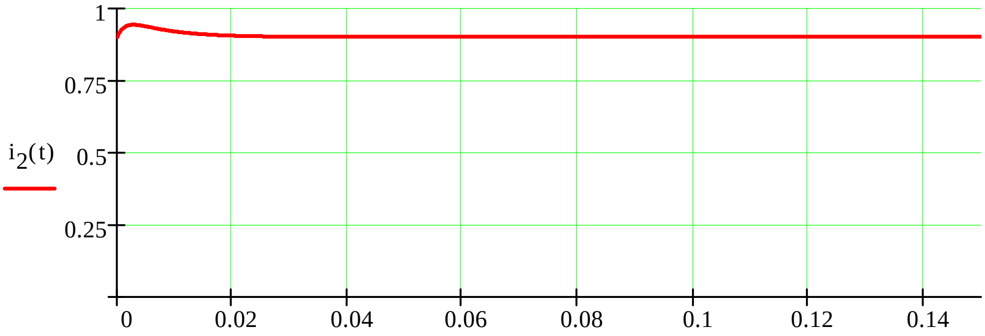
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

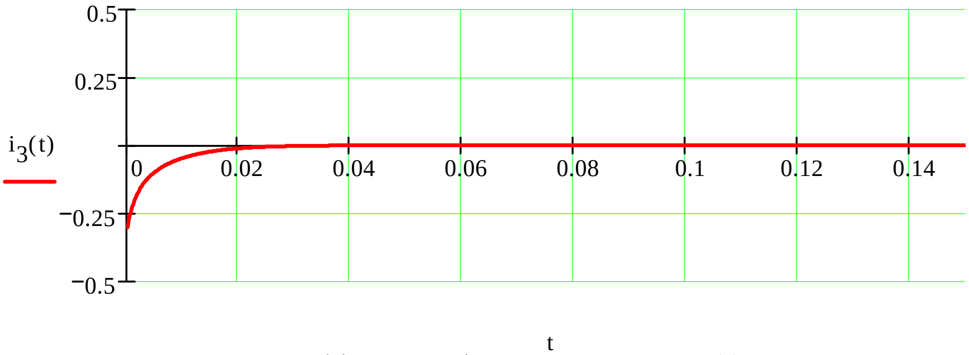
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 13.44295 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 1.557052 \cdot \exp(-141. \quad u_L(0) = 15$



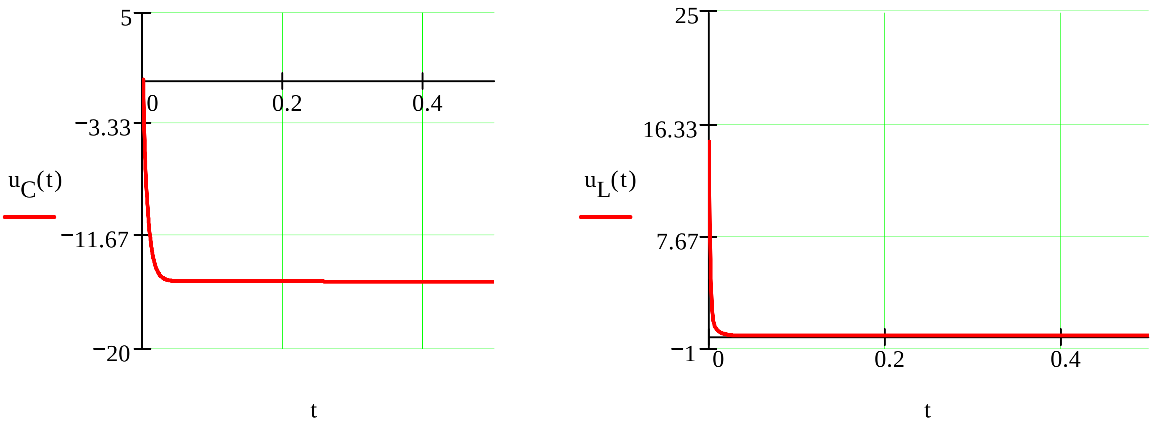
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

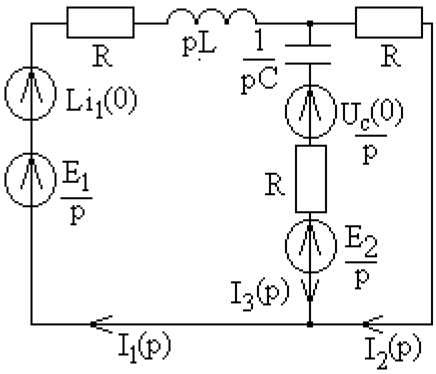


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\quad$ $u_{Lдк} := 0$

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

Початкові умови:

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

$u_{C0} = 0$

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

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

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

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(6600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^{5} + 6.0000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

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

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(9.0000 \cdot p^{2.} + 8100.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^{5}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(6600.0\cdot p + 9.0000\cdot 10^5 + 6.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(10.0\cdot p^{2.} + 8500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(9.0000\cdot p^{2.} + 8100.0\cdot p + 9.0000\cdot 10^5\right)}{p^{1.}\cdot\left(10.0\cdot p^{2.} + 8500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{factor}\end{matrix}\right. \rightarrow \frac{-3000}{p}\cdot\frac{(500+p)}{\left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)}$$

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

$$u_L(p)\ \text{factor}\ \rightarrow 15\cdot\frac{(p+200)}{\left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := 6600.0\cdot p + 9.0000\cdot 10^5 + 6.0000\cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(10.0\cdot p^{2.} + 8500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^6\right)^{1.}$$

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

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

$N_1(p_0) = 9\times 10^5 \qquad N_1(p_1) = -6.997\times 10^5 \qquad N_1(p_2) = 8.844\times 10^4$

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

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow .90000 - .18961\cdot\exp(-708.95\cdot t) - .11041\cdot\exp(-141.05\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := -3000\cdot(500+p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(850\cdot p + 100000 + p^2\right)$$

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

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

$N_u(p_0) = -1.5 \times 10^6$ $\qquad N_u(p_1) = -1.077 \times 10^6$ $\qquad N_u(p_2) = 6.269 \times 10^5$

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

$dM_u(p_0) = 1 \times 10^5$ $\qquad dM_u(p_1) = -8.01 \times 10^4$ $\qquad dM_u(p_2) = 4.026 \times 10^5$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 8.171 \times 10^{-4}$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -15. + 13.444 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) + 1.5569 \cdot \exp(-708.95 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := 15 \cdot (p + 200)$ $\qquad M_L(p) := \left(850 \cdot p + 100000 + p^2\right)$

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

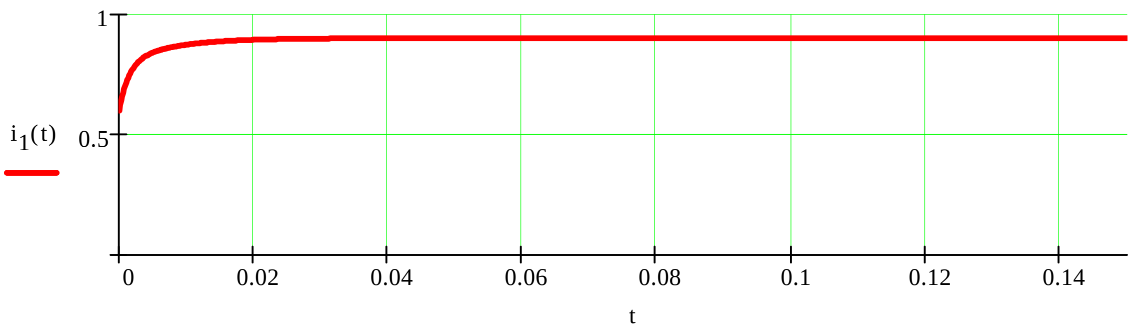
$N_L(p_1) = 884.25$ $\qquad N_L(p_2) = -7.634 \times 10^3$

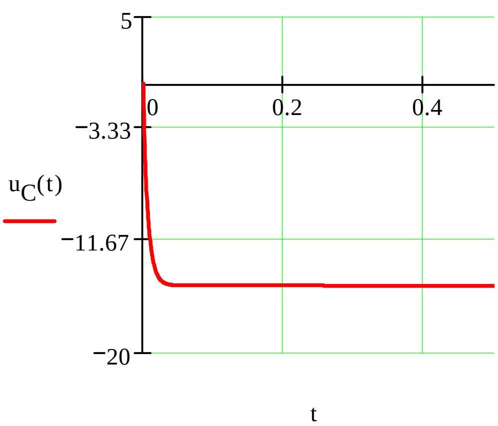
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 850 + 2 \cdot p$$

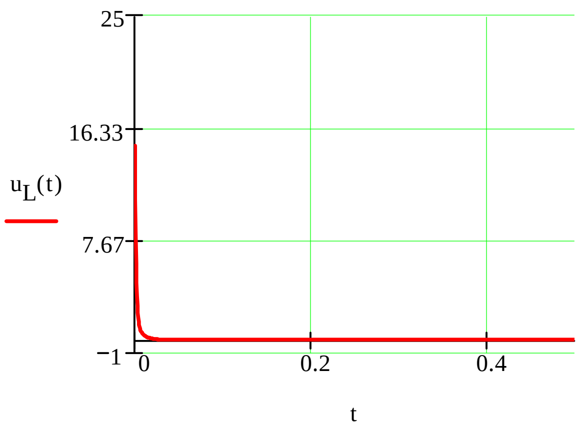
$dM_L(p_1) = 567.9$ $\qquad dM_L(p_2) = -567.9$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 15$$

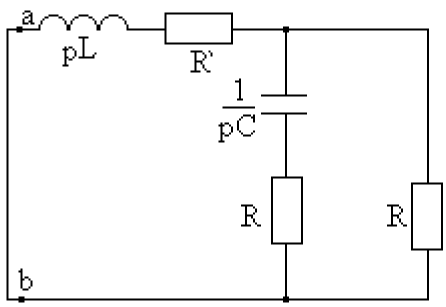






Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС Е1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

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



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

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

$$D = 0$$

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

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

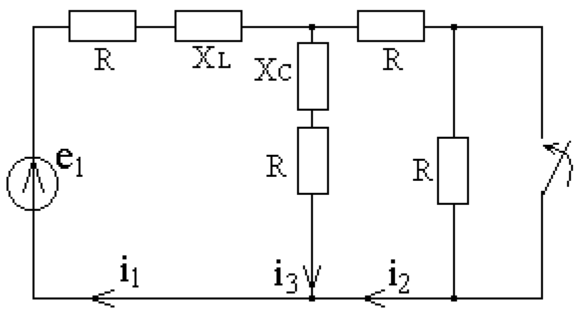
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 50 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 20$$

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

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

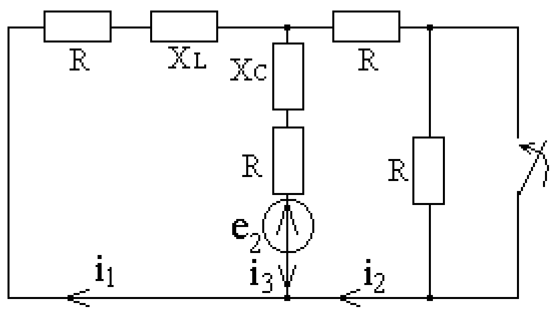


$$Z'_{vx} := R + i \cdot X_L + \frac{2 \cdot R \cdot (R - i \cdot X_C)}{2 \cdot R + R - i \cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 90$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.707 + 0.707i \qquad F(I'_{1дк}) = (1 \quad 45)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{(R - i \cdot X_C)}{2 \cdot R + R - i \cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.424 + 0.141i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.447 \quad 18.435)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = 0.283 + 0.566i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.632 \quad 63.435)$$



$$Z''_{vx} := R - X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad Z''_{vx} = 84.498 - 41.266i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = 0.207 + 0.603i \qquad F(I''_{3дк}) = (0.638 \;\; 71.03)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{(2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad I''_{1дк} = 0.189 + 0.377i \qquad F(I''_{1дк}) = (0.422 \;\; 63.435)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = 0.019 + 0.226i \qquad F(I''_{2дк}) = (0.227 \;\; 85.236)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 0.896 + 1.084i \qquad F(I_{1дк}) = (1.406 \;\; 50.44)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.443 + 0.368i \qquad F(I_{2дк}) = (0.576 \;\; 39.685)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 0.075 - 0.038i \qquad F(I_{3дк}) = (0.084 \;\; -26.565)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = -1.886 - 3.771i \qquad F(u_{Cдк}) = (4.216 \;\; -116.565)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -21.685 + 17.913i \qquad F(u_{Lдк}) = (28.127 \;\; 140.44)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cдк}(0) = -5.333$$

$$i_{Lдк}(0) = 1.533$$

Given

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

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

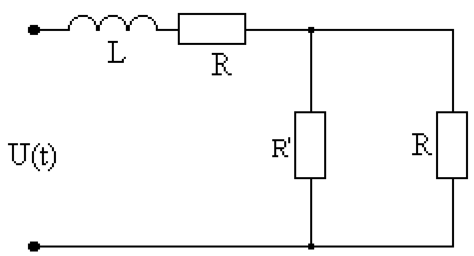
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$$

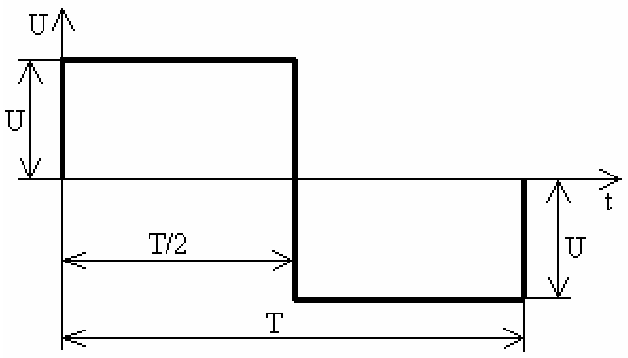
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 1.533$ $\quad i_{20} = 1.313$ $\quad i_{30} = 0.22$ $\quad u_{L0} = -52.333$ $\quad u_{C0} = -5.333$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.9$ $\quad E_1 := 90$ $\quad E := 1$ $\quad R' := R + R$





За допомогою класичного метода визначим:

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

$$p := \frac{R' \cdot R}{R' + R} + R + p \cdot L \;\Big|\begin{matrix} solve, p \\ float, 5\end{matrix} \rightarrow -833.33 \qquad p = -833.33 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 1.08 \times 10^{-3}$$

$$i_1(t) := \frac{E}{\frac{R' \cdot R}{R' + R} + R} - \frac{E}{\frac{R' \cdot R}{R' + R} + R} \cdot e^{p \cdot t}$$

$$U_L(t) := L \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.2000 \cdot 10^{-2} - 1.2000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$$

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1$ $\qquad U_0 = 90$

$U_1 := E_1$ $\qquad U_1 = 90$ $\qquad 0 < t < \frac{T}{2}$

$U_2 := -E_1$ $\qquad U_2 = -90$ $\qquad \frac{T}{2} < t < T$

$U_3 := 0$ $\qquad T < t < \infty$

$U'_1 := 0$ $\qquad U'_2 := 0$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t)$$

$$i_1(t) \;\Big|\begin{matrix} factor \\ float, 3\end{matrix} \rightarrow 1.08 - 1.08 \cdot \exp(-833. \cdot t)$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$i_2(t) \text{ float}, 3 \rightarrow -1.08 - 1.08 \cdot \exp(-833. \cdot t) + 2.16 \cdot \exp(-833. \cdot t + .450)$$

$$i_3(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot g_{11}(t - T)$$

$$i_3(t) \;\Big|\begin{matrix} factor \\ float, 3\end{matrix} \rightarrow -1.08 \cdot \exp(-833. \cdot t) + 2.16 \cdot \exp(-833. \cdot t + .450) - 1.08 \cdot \exp(-833. \cdot t + .900)$$

Напруга на індуктивністі на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow 90.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$$

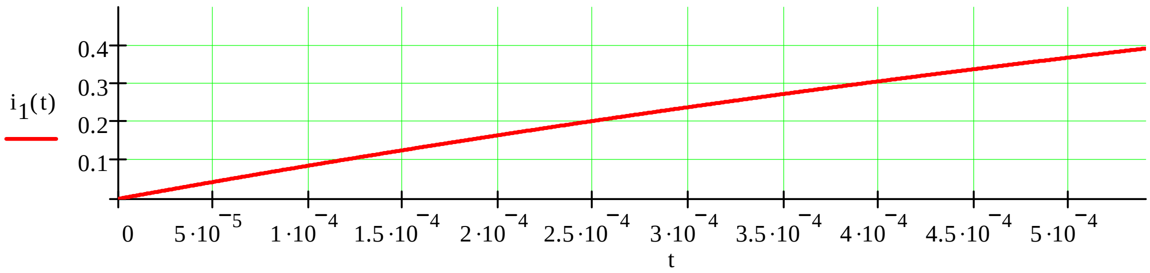
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow 90.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t) - 180.00 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + .45000)$$

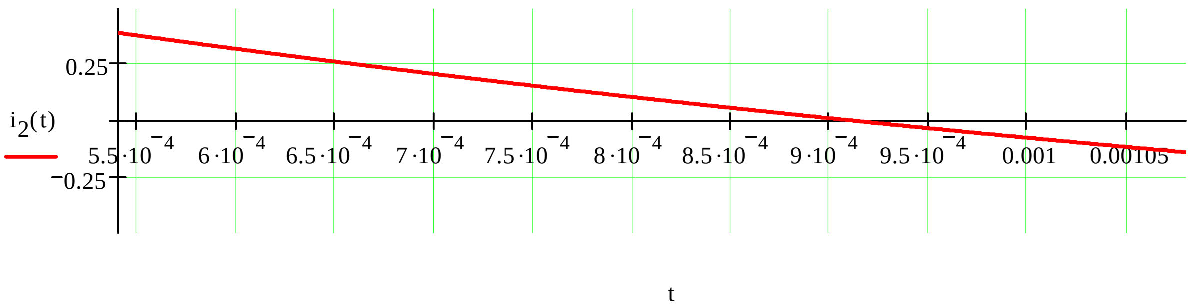
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \left(U_3 - U_2\right) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow 90.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t) - 180.00 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + .45000) + 90.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + .90000)$$

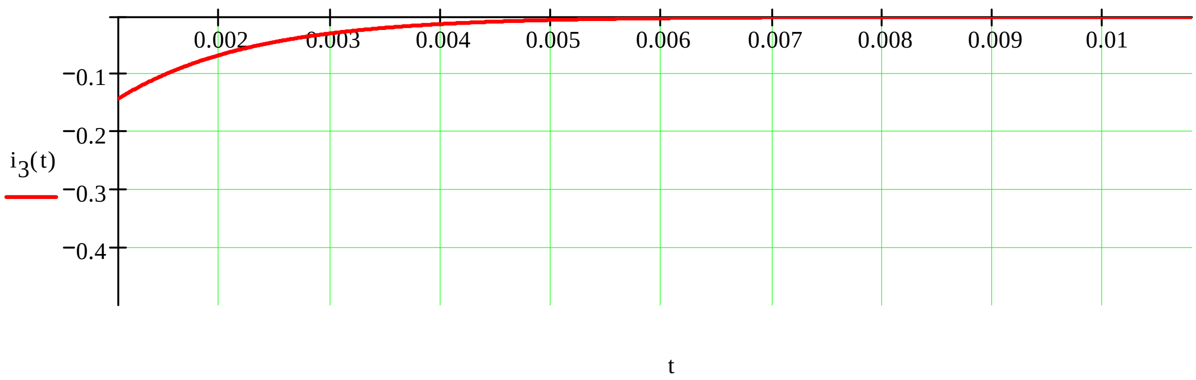
На промежутке от 0 до T/2



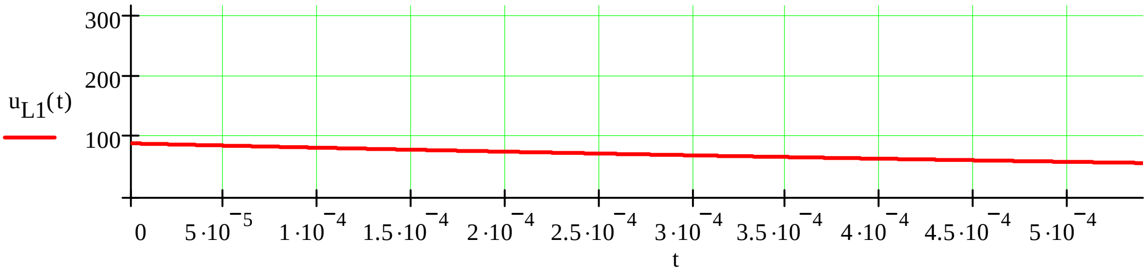
На промежутке от T/2 до T



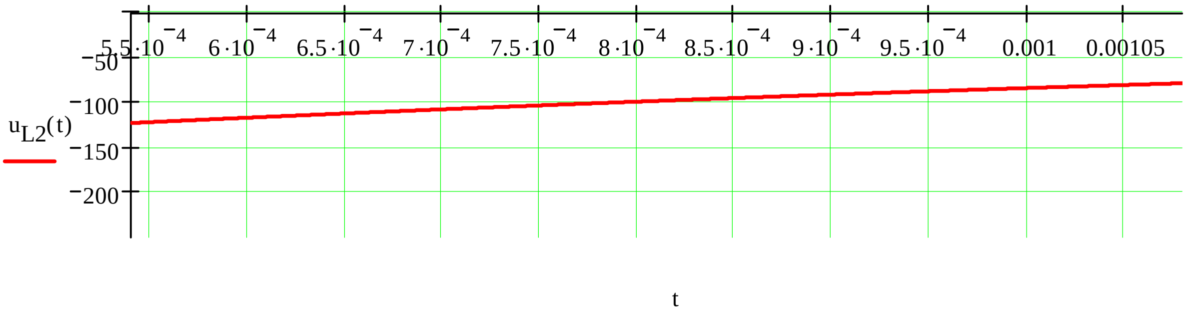
На промежутке от T до 10T



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от 0 до T/2



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от T/2 до T



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от T до 10T