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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 414

Виконав: ________________
____
____
____

Перевірив: ________________

Київ 2007

Умова задання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

    1) класичним методом розрахзувати напруги на реактивних елементах та струми перехідного процесу;

    2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС E1 та напругу на реактивному елементі операторним методом;

    3) побудувати в одному часовому масштабі діаграми струму та напруги на реактивних елементах.

2. Дослідити, яким повинен бути активний опір у вітці з джерелом E1, щоб перехідний процес проходив в граничному режимі.

3. Визначити струми в вітках та напруги на реактивних елементах в момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійних ЕДС E1i E2 в колі діють синусоїдні джерела.

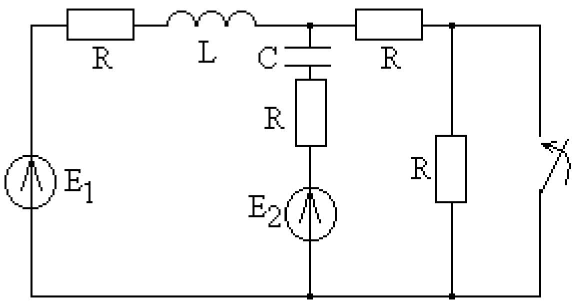
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

    а) виключити катушку індуктивності чи ємність, замінивши останню опором R;

    б) вважаючи, що замість ждерела постійної ЕДС E1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

    в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивному елементі методом інтеграла Дюамеля при періоді T, заданому в долях від τ;

    г) побудувати в одному часовому масштабі діаграми напруги на вході, вхідного струму і напруги на реактивних елементі.



Основна схема

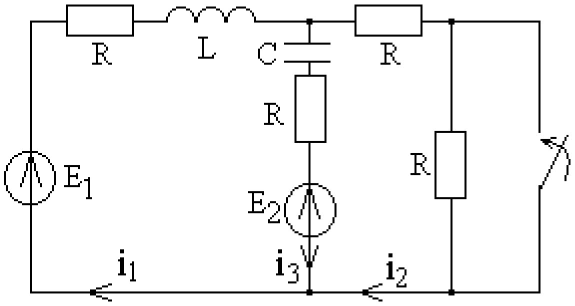
Вхідні данні:

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

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

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

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

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

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

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad$ $di_{10} = 100$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad$ $du_{C0} = -428.571$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{20} = 45.714$ $\quad di_{30} = 54.286$ $\quad du_{L0} = -7.286 \times 10^{3}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (p \cdot L + R) \ \Bigg|\begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -495.05 \\ -19.238 \end{pmatrix}$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -495.05$ $\qquad p_2 = -19.238$

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

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

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

$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A_1, A_2)$ $\qquad A_1 = -0.198$ $\qquad A_2 = -0.102$

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

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

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \mathrm{float}, 7 \ \rightarrow .9000000 - .1980375 \cdot \exp(-495.05 \cdot t) - .1019625 \cdot \exp(-1$ $i_1(0) = 0.6$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2)$ $\qquad B_1 = -0.096$ $\qquad B_2 = 0.096$

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

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

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)$ float, 7 $\rightarrow .9000000 - 9.607636 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-495.05 \cdot t) + 9.607636 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-$ $i_2(0) = 0.9$

Given

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

$di_{30} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2$ $di_{30} = 54.286$

$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2)$ $C_1 = -0.102$ $C_2 = -0.198$

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

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

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ float, 7 $\rightarrow -.1019611 \cdot \exp(-495.05 \cdot t) - .1980389 \cdot \exp(-19.238 \cdot t)$ $i_3(0) = -0.3$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2)$ $D_1 = 0.294$ $D_2 = 14.706$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)$ float, 7 $\rightarrow -15. + .2942369 \cdot \exp(-495.05 \cdot t) + 14.70576 \cdot \exp(-$ $u_C(0) = -3.1 \times 10^{-6}$

Given

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

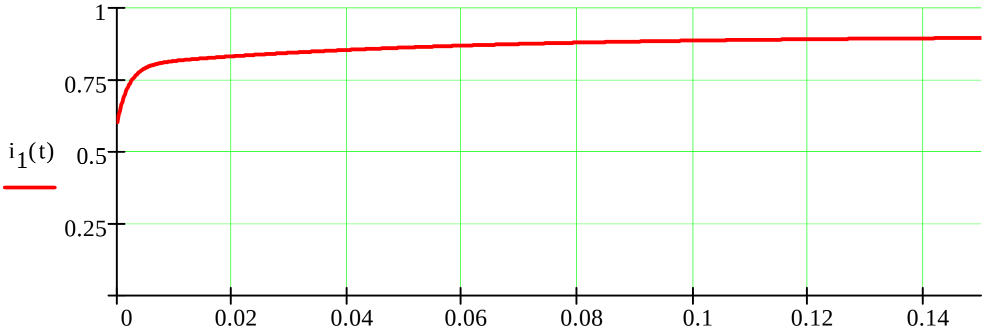
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2)$ $F_1 = 14.706$ $F_2 = 0.294$

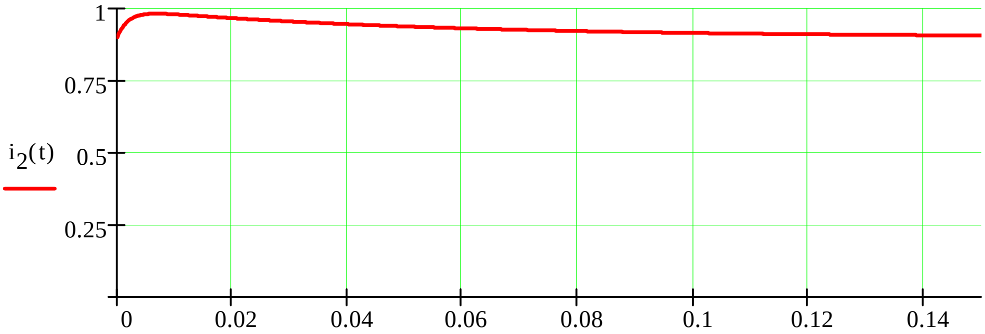
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

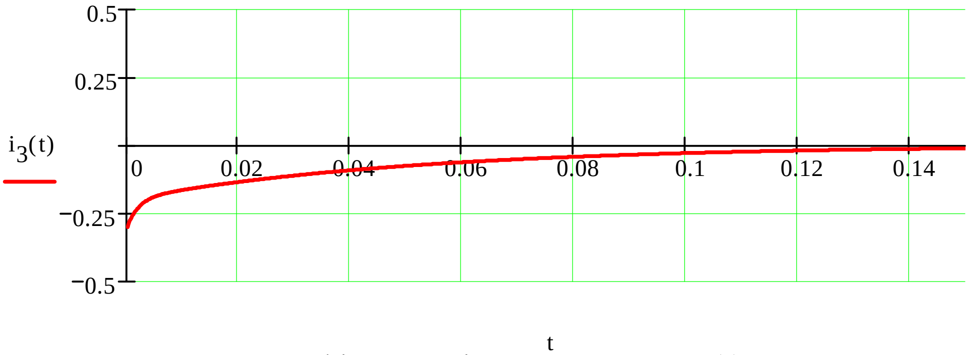
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)$ float, 7 $\rightarrow 14.70569 \cdot \exp(-495.05 \cdot t) + .2943089 \cdot \exp(-19.2$ $u_L(0) = 15$



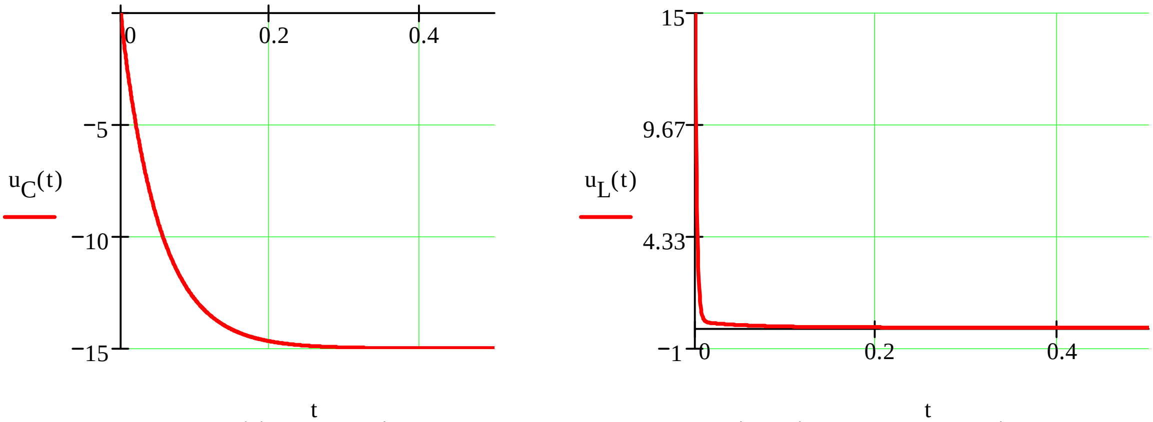
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

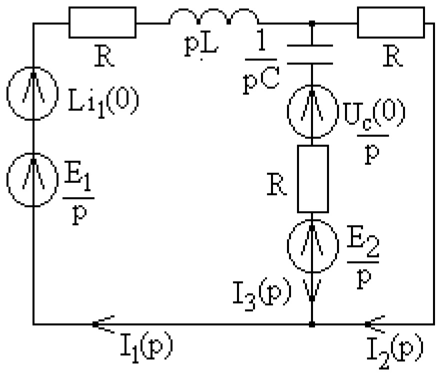


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$$i_{3дк} := 0 \qquad u_{Lдк} := 0$$

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

Початкові умови:

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

$$u_{C0} = 0$$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(7714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(6128.6 \cdot p + 1.2857 \cdot 10^5 + 9.0000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

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

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(7628.6 \cdot p + 13.500 \cdot p^{2.} + 1.2857 \cdot 10^5\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(6128.6\cdot p + 1.2857\cdot 10^{5} + 9.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(7714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^{5} + 15.000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(7628.6\cdot p + 13.500\cdot p^{2.} + 1.2857\cdot 10^{5}\right)}{p^{1.}\cdot\left(7714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^{5} + 15.000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{factor}\end{matrix}\right. \rightarrow \frac{-21429}{p}\cdot\frac{(1000 + 3\cdot p)}{\left(77143\cdot p + 1428600 + 150\cdot p^{2}\right)}$$

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

$$u_L(p)\ \text{factor}\ \rightarrow 45\cdot\frac{(7\cdot p + 200)}{\left(10800\cdot p + 200000 + 21\cdot p^{2}\right)}$$

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

$$N_1(p) := \left(6128.6\cdot p + 1.2857\cdot 10^{5} + 9.0000\cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(7714.3\cdot p + 1.4286\cdot 10^{5} + 15.000\cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \left|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -495.05\\ -19.239\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\qquad p_1 = -495.05$ $\qquad p_2 = -19.239$

$N_1(p_0) = 1.286\times 10^{5}$ $\qquad N_1(p_1) = -6.997\times 10^{5}$ $\qquad N_1(p_2) = 1.399\times 10^{4}$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \text{factor}\ \rightarrow \frac{77143}{5}\cdot p + 142860 + 45\cdot p^{2}$$

$dM_1(p_0) = 1.429\times 10^{5}$ $\qquad dM_1(p_1) = 3.533\times 10^{6}$ $\qquad dM_1(p_2) = -1.373\times 10^{5}$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow .89997 - .19804\cdot\exp(-495.05\cdot t) - .10191\cdot\exp(-19.239\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := -21429\cdot(1000 + 3\cdot p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(77143\cdot p + 1428600 + 150\cdot p^{2}\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_u(p)\ \left|\begin{matrix}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\ -19.24\\ -495.04\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\qquad p_1 = -19.24$ $\qquad p_2 = -495.04$

$N_u(p_0) = -2.143 \times 10^7$ $\quad N_u(p_1) = -2.019 \times 10^7$ $\quad N_u(p_2) = 1.04 \times 10^7$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 154286 \cdot p + 1428600 + 450 \cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 1.429 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_1) = -1.373 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_2) = 3.533 \times 10^7$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = -2.215 \times 10^{-3}$$

$$u_C(t) \;\Big|\; \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow -15. + 14.704 \cdot \exp(-19.24 \cdot t) + .29424 \cdot \exp(-495.04 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := 45 \cdot (7 \cdot p + 200)$ $\qquad M_L(p) := \left(10800 \cdot p + 200000 + 21 \cdot p^2\right)$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \;\Big|\; \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -19.24 \\ -495.04 \end{pmatrix} \qquad p_1 = -19.24 \qquad p_2 = -495.04$$

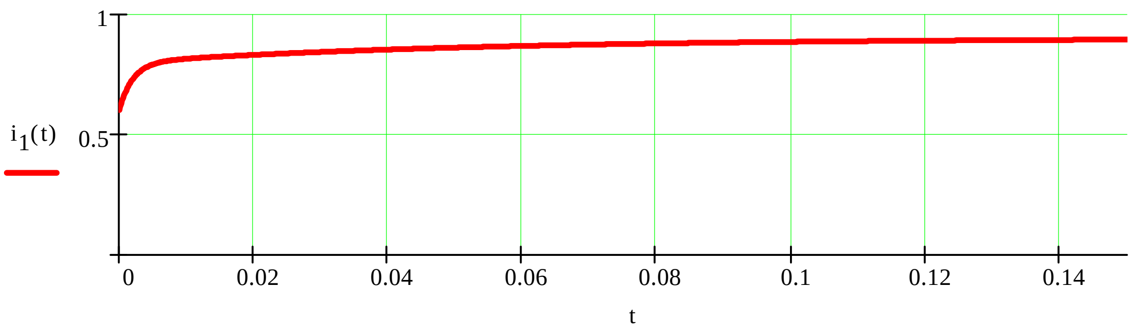
$N_L(p_1) = 2.939 \times 10^3$ $\quad N_L(p_2) = -1.469 \times 10^5$

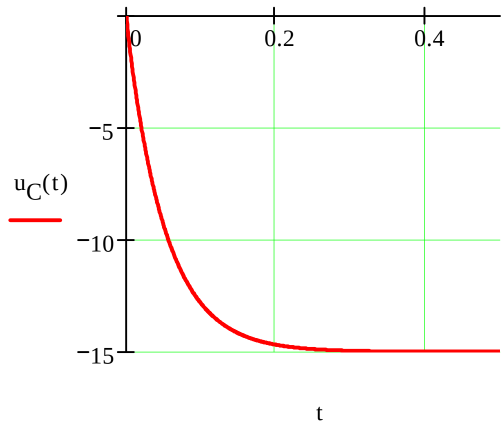
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 10800 + 42 \cdot p$$

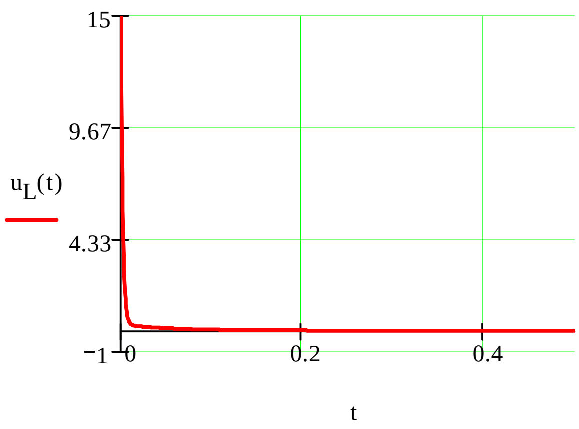
$dM_L(p_1) = 9.992 \times 10^3$ $\quad dM_L(p_2) = -9.992 \times 10^3$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

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

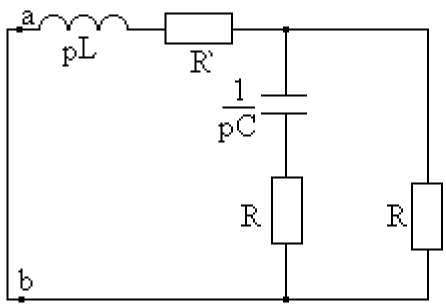






Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС Е1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$R' := \left(2\cdot R\cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right)^2 - 4\cdot (2\cdot R\cdot L)\cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-37.496 \\ -8.2186\end{pmatrix}$$

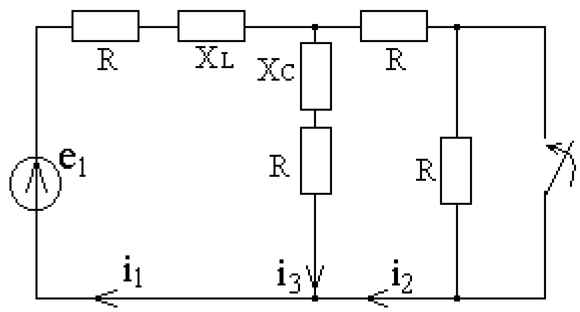
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

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

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

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

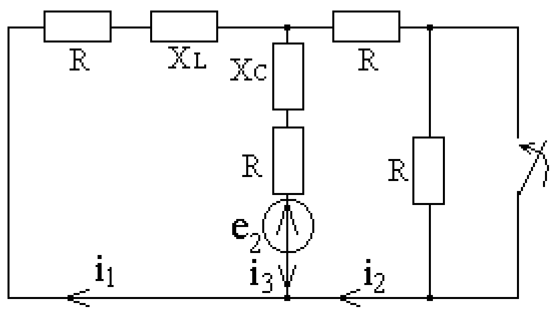


$$Z'_{vx} := R + i\cdot X_L + \frac{2\cdot R\cdot (R - i\cdot X_C)}{2\cdot R + R - i\cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 83.484 + 26.833i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.913 + 0.469i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.026 \quad 27.182)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot \frac{(R - i\cdot X_C)}{2\cdot R + R - i\cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.321 + 0.128i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.345 \quad 21.778)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = 0.592 + 0.341i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.683 \quad 29.908)$$



$$Z''_{vx} := R - X_C \cdot i + \frac{\left(R + i \cdot X_L\right) \cdot (2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad Z''_{vx} = 85.897 + 5.678i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = 0.524 + 0.459i \qquad F\left(I''_{3дк}\right) = (0.697 \quad 41.218)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{(2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad I''_{1дк} = 0.395 + 0.227i \qquad F\left(I''_{1дк}\right) = (0.456 \quad 29.908)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = 0.129 + 0.232i \qquad F\left(I''_{2дк}\right) = (0.266 \quad 60.872)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 1.308 + 0.696i \qquad F\left(I_{1дк}\right) = (1.482 \quad 28.02)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.45 + 0.36i \qquad F\left(I_{2дк}\right) = (0.576 \quad 38.679)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 0.068 - 0.118i \qquad F\left(I_{3дк}\right) = (0.137 \quad -60.092)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot \left(-i \cdot X_C\right) \qquad u_{Cдк} = -0.846 - 0.487i \qquad F\left(u_{Cдк}\right) = (0.976 \quad -150.092)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -20.881 + 39.238i \qquad F\left(u_{Lдк}\right) = (44.448 \quad 118.02)$$

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

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

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

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

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

i

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -0.688$

$i_{Lдк}(0) = 0.984$

Given

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

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

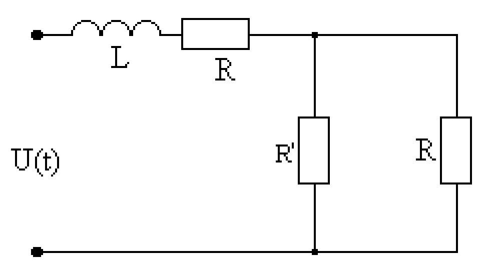
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$$

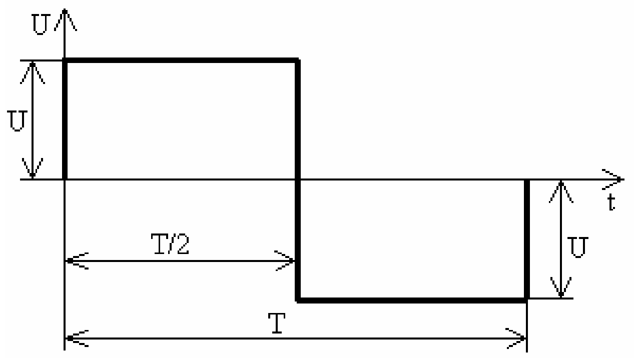
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{30}, i_{20}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 0.984$ $\qquad i_{20} = 1.085$ $\qquad i_{30} = -0.101$ $\qquad u_{L0} = -13.482$ $\qquad u_{C0} = -0.688$

Інтеграл Дюамеля

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





За допомогою класичного метода визначим:

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

$$p := \frac{R' \cdot R}{R' + R} + R + p \cdot L \;\left|\begin{matrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow -555.56 \qquad p = -555.56 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 1.62 \times 10^{-3}$$

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

$$U_L(t) := L \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) \;\text{float}, 5 \;\rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-555.56 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \;\text{float}, 5 \;\rightarrow 1.2000 \cdot 10^{-2} - 1.2000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-555.56 \cdot t)$$

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-555.56 \cdot t)$$

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:

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

$$i_1(t) \;\left|\begin{matrix}\text{factor} \\ \text{float}, 3\end{matrix}\right. \rightarrow 1.08 - 1.08 \cdot \exp(-556. \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \;\text{float}, 3 \;\rightarrow -1.08 - 1.08 \cdot \exp(-556. \cdot t) + 2.16 \cdot \exp(-556. \cdot t + .450)$$

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

$$i_3(t) \;\left|\begin{matrix}\text{factor} \\ \text{float}, 3\end{matrix}\right. \rightarrow -1.08 \cdot \exp(-556. \cdot t) + 2.16 \cdot \exp(-556. \cdot t + .450) - 1.08 \cdot \exp(-556. \cdot t + .900)$$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 90.000 \cdot \exp(-555.56 \cdot t)$$

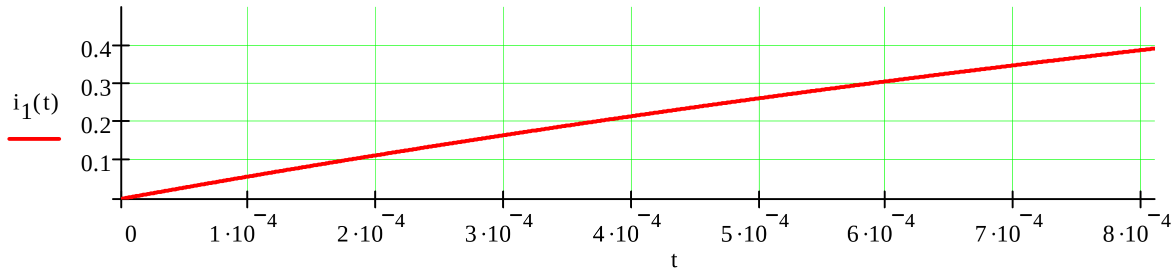
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 90.000 \cdot \exp(-555.56 \cdot t) - 180.00 \cdot \exp(-555.56 \cdot t + .45000)$$

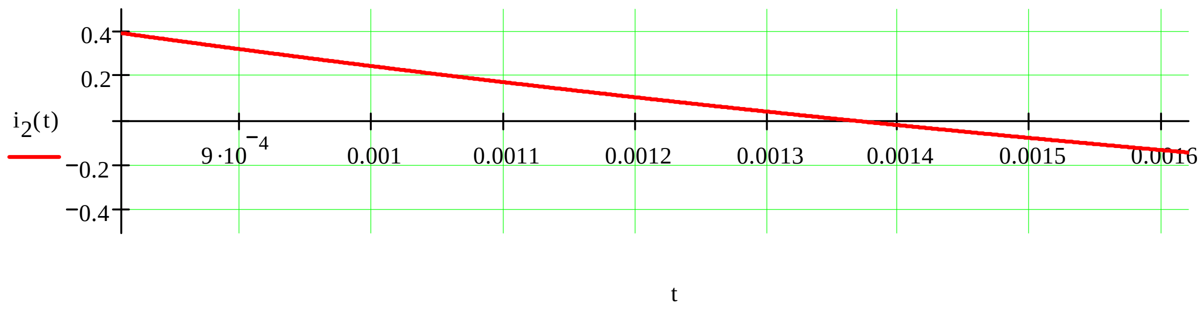
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \left(U_3 - U_2\right) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 90.000 \cdot \exp(-555.56 \cdot t) - 180.00 \cdot \exp(-555.56 \cdot t + .45000) + 90.000 \cdot \exp(-555.56 \cdot t + .90000)$$

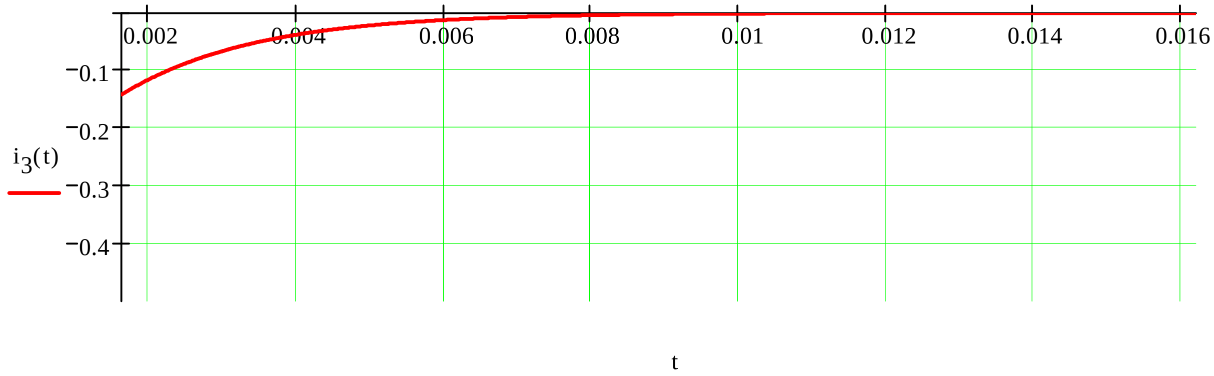
На промежутке от 0 до T/2



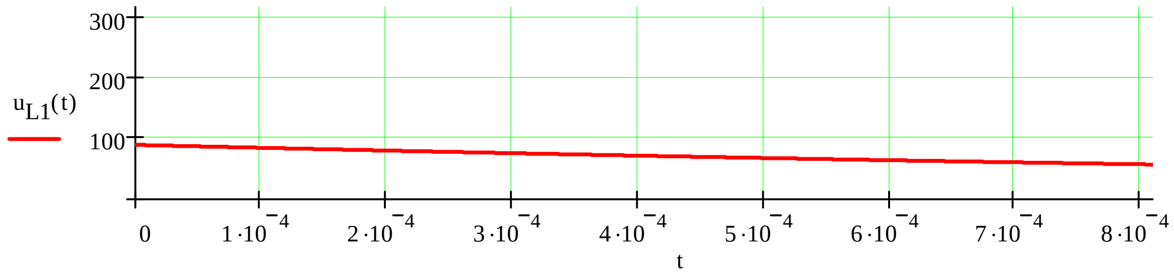
На промежутке от T/2 до T



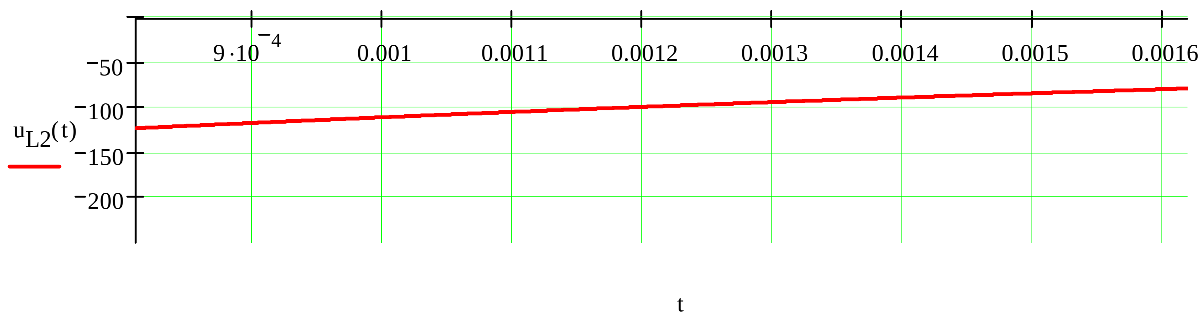
На промежутке от T до 10T



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