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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“

Варіант № 387

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.

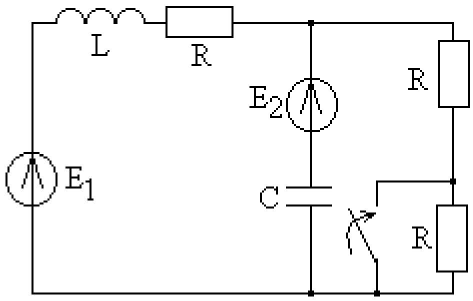
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

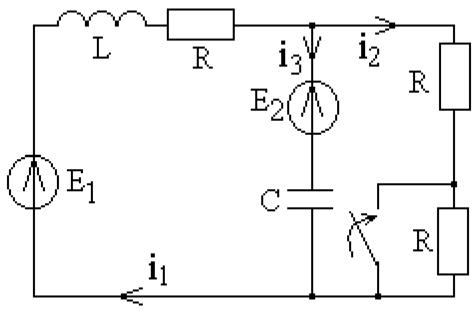
Вхідні данні:

$L := 0.1$ Гн $\quad C := 200 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 50$ Ом

$E_1 := 180$ В $\quad E_2 := 70$ В $\quad \psi := 120 \cdot deg$ C^0 $\quad \omega := 250$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.2$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R - E_2 \quad u_{Cдк} = 50$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 1.8$

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

$u'_C := E_1 - i'_1 \cdot R - E_2 \quad u'_C = 20$

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк} \quad i_{10} = 1.2$

$u_{C0} := u_{Cдк} \quad u_{C0} = 50$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})\ \mathrm{float}, 6 \ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.20000 \\ 2.40000 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i_{30} = -1.2 \quad i_{20} = 2.4 \quad u_{L0} = 0$

Незалежні початкові умови

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

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = -6 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$ $\qquad di_{20} = -120 \qquad di_{30} = 120 \qquad du_{L0} = 6 \times 10^3$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) + \left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (p \cdot L + R) \ \Big|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -300. - 100.00 \cdot i \\ -300. + 100.00 \cdot i \end{pmatrix}$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -300 - 100i \qquad p_2 = -300 + 100i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)| \quad \delta = 300 \qquad \omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)| \quad \omega_0 = 100$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

$i''_1(t) = A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1)$

$i''_2(t) = B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)$

$i''_3(t) = C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)$

$u''_C(t) = D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)$

$u''_L(t) = F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)$

Визначення сталих інтегрування:

Для струму i1(t):

Given

$i_{10} - i'_1 = A \cdot \sin(v_1)$

$di_{10} = -A \cdot \delta \cdot \sin(v_1) + A \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_1)$

$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1)\ \text{float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.8974 & -1.8974 \\ -2.8198 & .32175 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = 1.897 \qquad v_1 = -2.82$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1)\ \text{float}, 5 \rightarrow 1.8974 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - 2.8198)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)\ \text{float}, 4 \rightarrow 1.800 + 1.897 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - 2.820)$

Для струму i2(t):

$i_{20} - i'_2 = B \cdot \sin(v_2)$

$di_{20} = -B \cdot \delta \cdot \sin(v_2) + B \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_2)$

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B, v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -.84853 & .84853 \\ -2.3562 & .78540 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -0.849$ $\qquad v_2 = -2.356$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow -.84853 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - 2.3562)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 1.800 - .8485 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - 2.356)$

Для струму i3(t):

$i_{30} - i'_3 = C \cdot \sin(v_3)$

$di_{30} = -C \cdot \delta \cdot \sin(v_3) + C \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_3)$

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(C, v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -2.6833 & 2.6833 \\ .46365 & -2.6779 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -2.683$ $\qquad v_3 = 0.464$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow -2.6833 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t + .46365)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -2.683 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t + .4637)$

Для напруги Uc(t):

$u_{C0} - u'_C = D \cdot \sin(v_C)$

$du_{C0} = -D \cdot \delta \cdot \sin(v_C) + D \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_C)$

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \text{Find}(D, v_C) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -42.426 & 42.426 \\ -2.3562 & .78540 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -42.426$ $\qquad v_C = -2.356$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C) \text{ float}, 5 \rightarrow -42.426 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - 2.3562)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 20. - 42.43 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - 2.356)$

Для напруги Ul(t):

$u_{L0} - u'_L = F \cdot \sin(v_L)$

$du_{L0} = -F \cdot \delta \cdot \sin(v_L) + F \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_L)$

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \text{Find}(F, v_L) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 60. & -60. \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

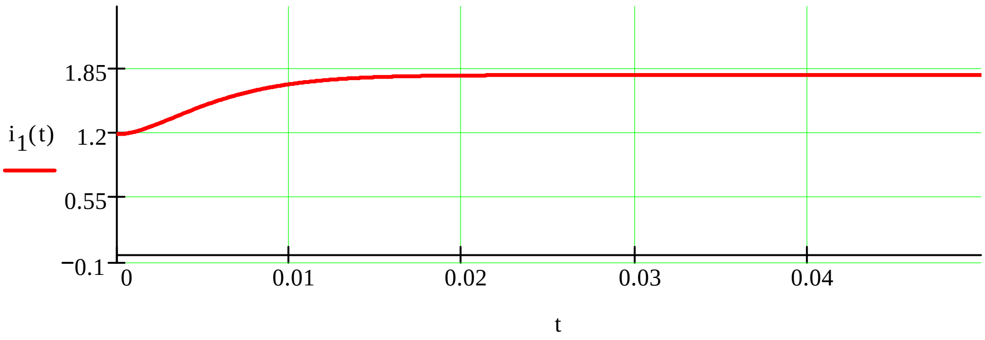
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = 60$ $\qquad v_L = 0$

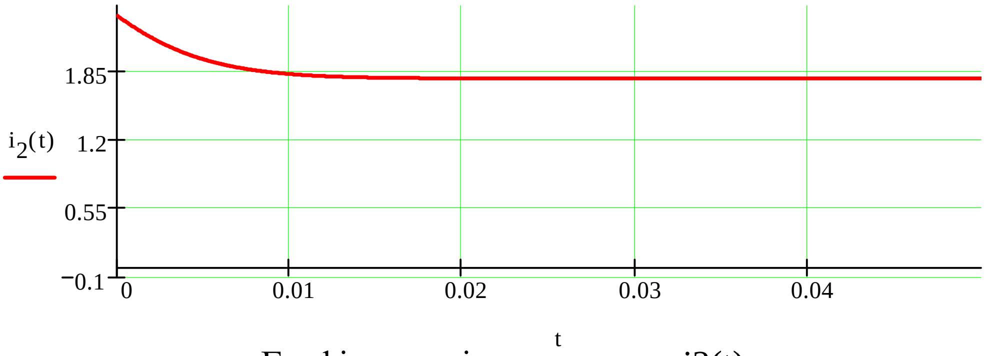
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L) \text{ float}, 5 \rightarrow 60. \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$

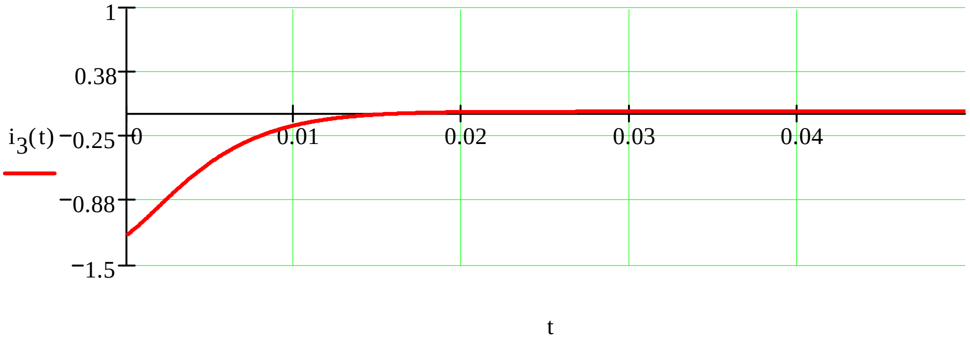
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 60. \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t)$



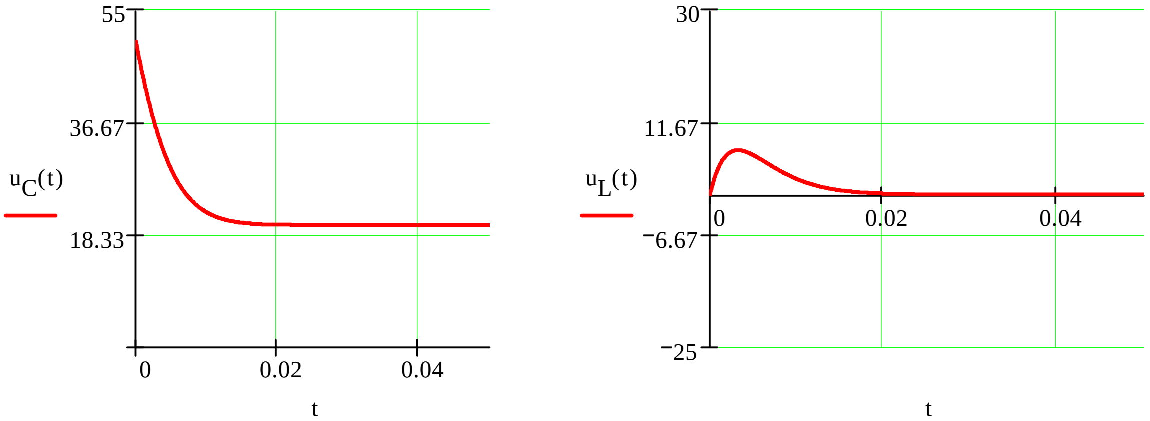
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

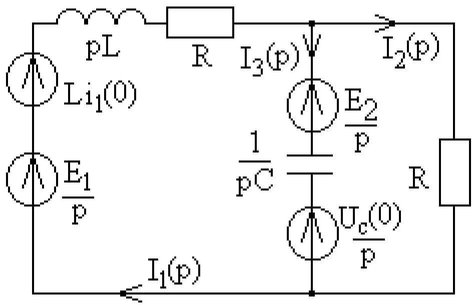


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{3 \cdot R}$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.2$

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R - E_2$ $\qquad u_{Cдк} = 50$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк}$ $\qquad i_{L0} = 1.2$

$u_{C0} = 50$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(5.0 \cdot p^{2.} + 3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(3600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^5 + 6.0000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(12.0 \cdot p^{2.} + 6600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^5\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(3600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^5 + 6.0000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(5.0 \cdot p^{2.} + 3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(12.0 \cdot p^{2.} + 6600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^5\right)}{p^{1.} \cdot \left(5.0 \cdot p^{2.} + 3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p) \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{float}, 5\\ \text{factor}\end{smallmatrix} \rightarrow \frac{50}{p} \cdot \frac{\left(40000 + p^2 + 480 \cdot p\right)}{\left(100000 + p^2 + 600 \cdot p\right)}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{6000}{\left(100000 + p^2 + 600 \cdot p\right)}$$

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

$$N_1(p) := 3600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot 10^5 + 6.0000 \cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p \cdot \left(5.0 \cdot p^{2.} + 3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{smallmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -300. - 100.00 \cdot i \\ -300. + 100.00 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -300 - 100i \qquad p_2 = -300 + 100i$

$N_1(p_0) = 9 \times 10^5 \qquad N_1(p_1) = 3 \times 10^5 \qquad N_1(p_2) = 3 \times 10^5$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor } \rightarrow 15 \cdot p^2 + 6000 \cdot p + 500000$$

$dM_1(p_0) = 5 \times 10^5 \qquad dM_1(p_1) = -1 \times 10^5 + 3i \times 10^5 \qquad dM_1(p_2) = -1 \times 10^5 - 3i \times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 1.2$$

$$i_1(t) \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{smallmatrix} \rightarrow 1.8000 - .60000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \cos(100.00 \cdot t) - 1.80000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 50 \cdot \left(40000 + p^2 + 480 \cdot p\right) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(100000 + p^2 + 600 \cdot p\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{smallmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -300. + 100.00 \cdot i \\ -300. - 100.00 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -300 + 100i \qquad p_2 = -300 - 100i$

$N_u(p_0) = 2 \times 10^6 \qquad N_u(p_1) = -1.2 \times 10^6 - 6i \times 10^5 \qquad N_u(p_2) = -1.2 \times 10^6 + 6i \times 10^5$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 100000 + 3 \cdot p^2 + 1200 \cdot p$$

$dM_u(p_0) = 1 \times 10^5 \qquad dM_u(p_1) = -2 \times 10^4 - 6i \times 10^4 \qquad dM_u(p_2) = -2 \times 10^4 + 6i \times 10^4$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 50$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 20. + 30.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \cos(100.00 \cdot t) + 30.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 6000 \qquad M_L(p) := 100000 + p^2 + 600 \cdot p$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -300. + 100.00 \cdot i \\ -300. - 100.00 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -300 + 100i \qquad p_2 = -300 - 100i$$

$$N_L(p_1) = 6 \times 10^3 \qquad N_L(p_2) = 6 \times 10^3$$

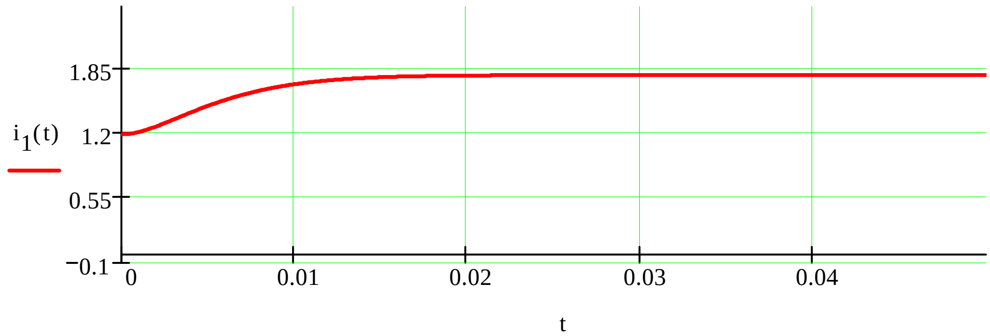
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 2 \cdot p + 600$$

$$dM_L(p_1) = 200i \qquad dM_L(p_2) = -200i$$

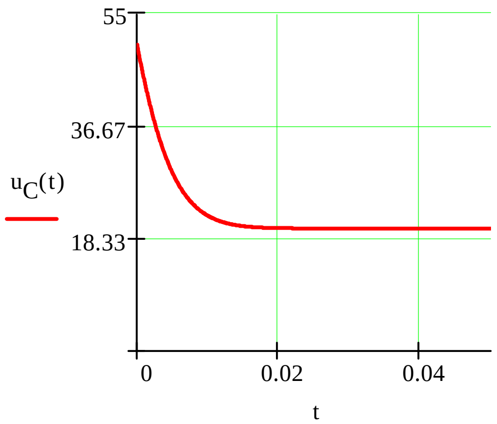
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

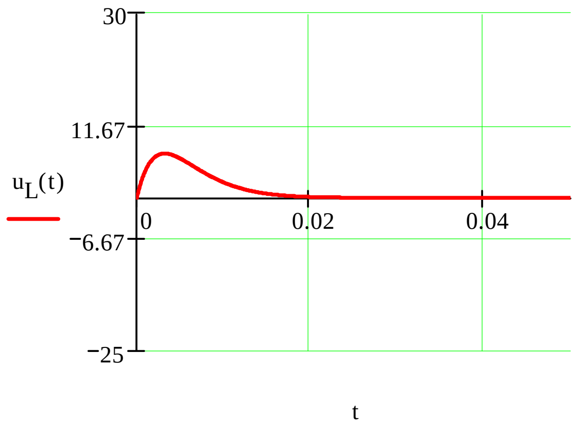
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 0$$

$$u_L(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 60.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$$



Графік перехідного струму i1(t).

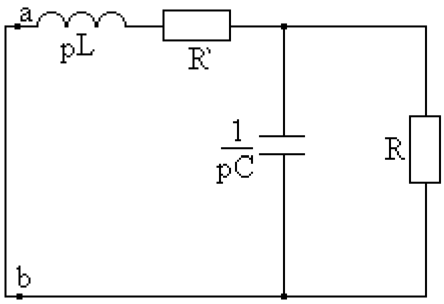




Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C}+\frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{float},5}^{\text{solve},R'} \rightarrow \begin{pmatrix}-34.721\\54.721\end{pmatrix} \qquad R' := 54.721$$

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

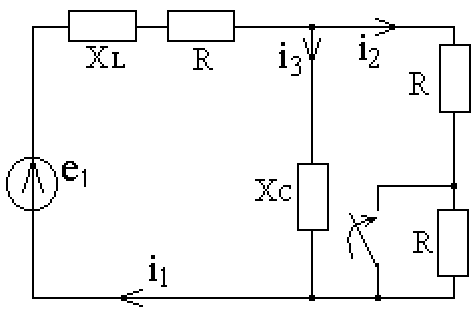
Визначити струми в вітках та напруги на реактивних елементах в момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійних ЕДС Е1і Е2 в колі діють синусоїдні джерела.

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

$$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C} \qquad X_C = 20 \qquad X_L := \omega\cdot L \qquad X_L = 25$$

$$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i} \qquad E_1 = -90+155.885i \qquad F(E_1) = (180\ \ 120)$$

$$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i} \qquad E_2 = -35+60.622i \qquad F(E_2) = (70\ \ 120)$$

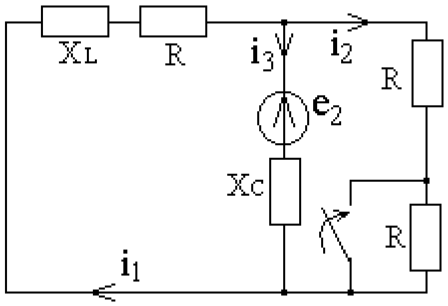


$$Z'_{vx} := R + i\cdot X_L + \frac{2\cdot R\cdot(i\cdot X_C)}{R+R-i\cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 46.154+44.231i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.671+2.735i \qquad F(I'_{1дк}) = (2.816\ \ 76.219)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{R+R-i\cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.552-0.024i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.552\ \ -2.471)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{2\cdot R}{R+R-i\cdot X_C} \qquad I'_{3дк} = 0.119+2.759i \qquad F(I'_{3дк}) = (2.761\ \ 87.529)$$



$$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot 2 \cdot R}{R + i \cdot X_L + R + R} \qquad Z''_{vx} = 35.135 - 9.189i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = -1.355 + 1.371i \qquad F(I''_{3дк}) = (1.927 \quad 134.657)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{2 \cdot R}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad I''_{1дк} = -0.731 + 1.036i \qquad F(I''_{1дк}) = (1.268 \quad 125.194)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{R + i \cdot X_L}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \qquad I''_{3дк} = -1.355 + 1.371i \qquad F(I''_{3дк}) = (1.927 \quad 134.657)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = -0.06 + 3.77i \qquad F(I_{1дк}) = (3.771 \quad 90.908)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = -0.073 + 0.311i \qquad F(I_{2дк}) = (0.32 \quad 103.106)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 1.474 + 1.387i \qquad F(I_{3дк}) = (2.024 \quad 43.271)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = 27.749 - 29.476i \qquad F(u_{Cдк}) = (40.482 \quad -46.729)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -94.262 - 1.494i \qquad F(u_{Lдк}) = (94.274 \quad -179.092)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -41.685$

$i_{Lдк}(0) = 5.332$

Given

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

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

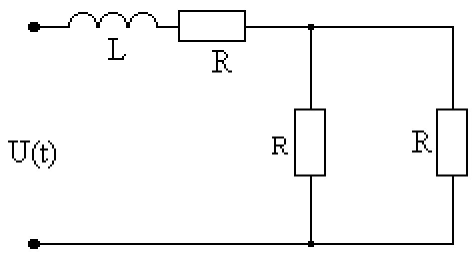
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0}$$

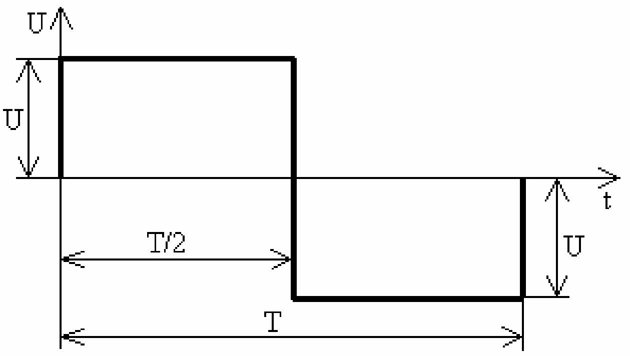
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 5.332$ $\quad i_{20} = 0.881$ $\quad i_{30} = 4.451$ $\quad u_{L0} = -90.207$ $\quad u_{C0} = -41.685$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.85$ $\quad E_1 := 180$ $\quad E := 1$





За допомогою класичного метода визначим:

$Z_{vx}(p) := 1.5 \cdot R + p \cdot L$

$p := 1.5 \cdot R + p \cdot L \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{smallmatrix} \rightarrow -750.$ $\quad p = -750$ $\quad T := \frac{1}{|p|} \cdot T$ $\quad T = 1.133 \times 10^{-3}$

$$i_1(t) := \frac{E}{1.5 \cdot R} - \frac{E}{1.5 \cdot R} \cdot e^{p \cdot t}$$

$$U_L(t) := L \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-750. \cdot t)$$

$g_{11}(t) := i_1(t)$ $\quad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 1.3333 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-750. \cdot t)$

$h_{uL}(t) := U_L(t) \rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-750. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1$ $\quad U_0 = 180$

$U_1 := E_1$ $\quad U_1 = 180$ $\quad 0 < t < \frac{T}{2}$

$U_2 := -E_1$ $\quad U_2 = -180$ $\quad \frac{T}{2} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t) \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{factor} \\ \text{float}, 3\end{smallmatrix} \rightarrow 2.40 - 2.40 \cdot \exp(-750. \cdot t)$

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

$i_2(t) \text{ float}, 3 \;\rightarrow -2.40 - 2.40 \cdot \exp(-750. \cdot t) + 4.80 \cdot \exp(-750. \cdot t + .425)$

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

$i_3(t) \;\Big|\begin{smallmatrix}\text{factor} \\ \text{float}, 3\end{smallmatrix} \rightarrow -1.00 \cdot 10^{-19} - 2.40 \cdot \exp(-750. \cdot t) + 4.80 \cdot \exp(-750. \cdot t + .425) - 2.40 \cdot \exp(-750. \cdot t + .850)$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 180.00 \cdot \exp(-750. \cdot t)$$

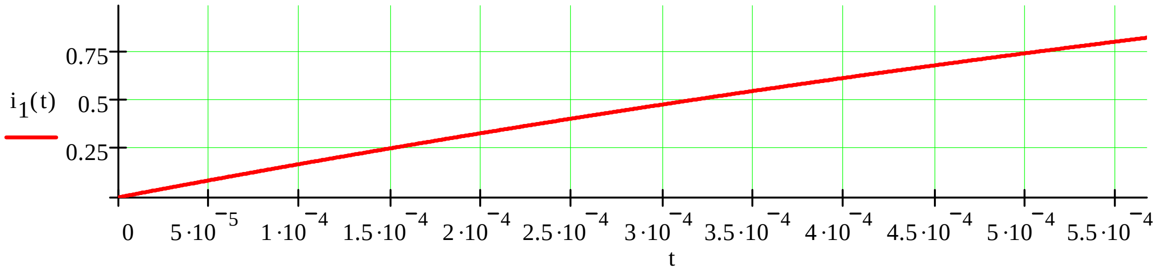
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 180.00 \cdot \exp(-750. \cdot t) - 360.00 \cdot \exp(-750. \cdot t + .42500)$$

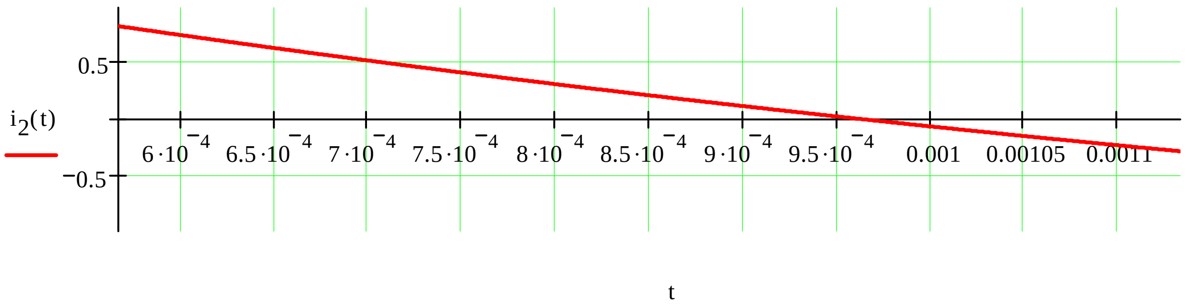
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \left(U_3 - U_2\right) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 180.00 \cdot \exp(-750. \cdot t) - 360.00 \cdot \exp(-750. \cdot t + .42500) + 180.00 \cdot \exp(-750. \cdot t + .85000)$$

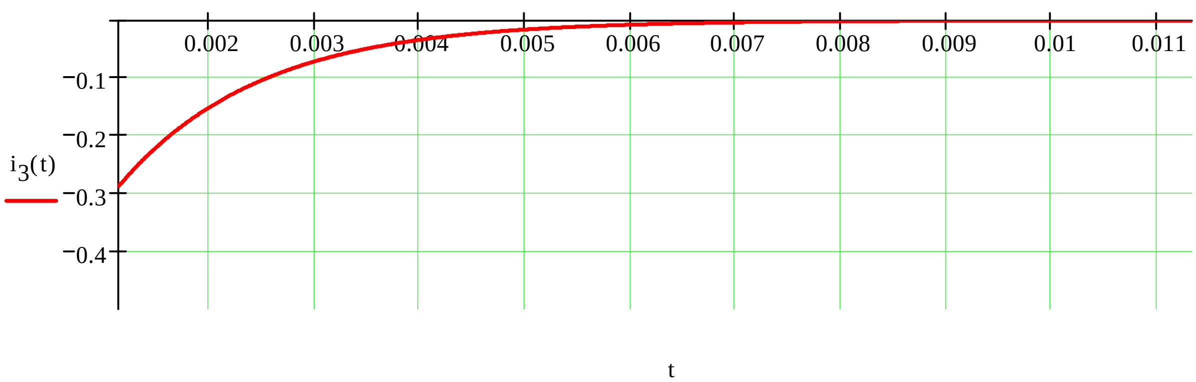
На промежутке от 0 до T/2



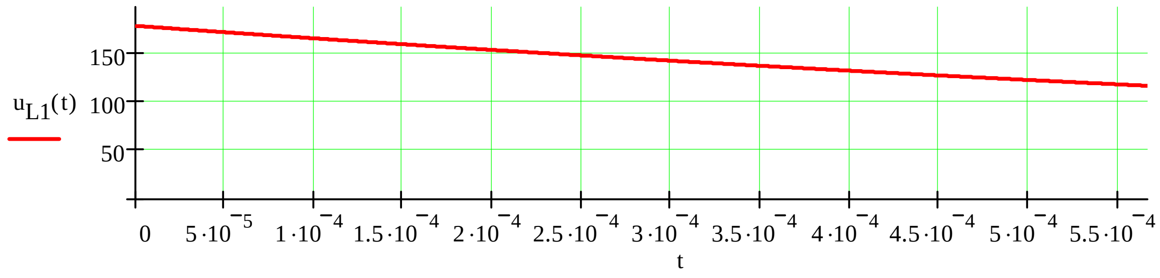
На промежутке от T/2 до T



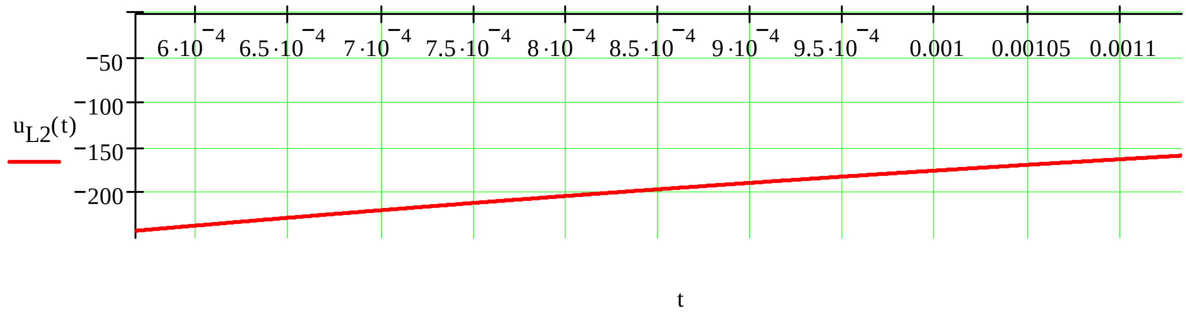
На промежутке от T до 10T



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