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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 670

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.

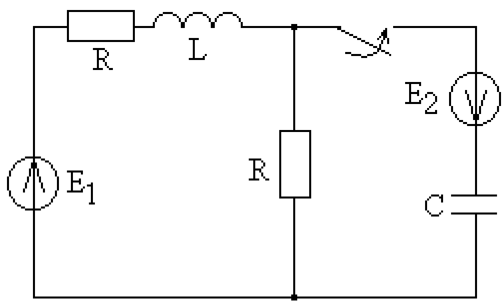
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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.



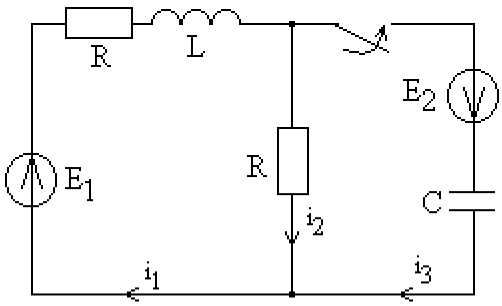
Вхідні данні:

$L := 0.125$ Гн $\quad C := 70 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 40$ Ом

$E_1 := 150$ В $\quad E_2 := 170$ В $\quad \psi := 75 \cdot deg$ C^0 $\quad \omega := 200$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1}{2R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 1.875$ $\quad i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\quad u_{Cдк} = 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2R}$ $\quad i'_2 := i'_1$ $\quad i'_2 = 1.875$ $\quad i'_3 := 0$

$u'_L := 0$ $\quad u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 245$

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк}$ $\quad i_{10} = 1.875$

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

Залежні початкові умови

Given

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

$E_1 = u_{L0} + i_{20} \cdot R + i_{10} \cdot R$

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

$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$ $\quad i_{30} = 6.125$ $\quad i_{20} = -4.25$ $\quad u_{L0} = 245$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{10} = 1.96 \times 10^3$ $\quad du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 8.75 \times 10^4$

Залежні початкові умови

Given

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

$0 = du_{L0} + di_{20} \cdot R + di_{10} \cdot R$

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

$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$ $\quad di_{20} = 2.188 \times 10^3$ $\quad di_{30} = -227.5$ $\quad du_{L0} = -1.659 \times 10^5$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) + (p \cdot L + R) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \ \Bigg|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -338.57 - 337.55 \cdot i \\ -338.57 + 337.55 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -338.57 - 337.55i \qquad p_2 = -338.57 + 337.55i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := \left|\mathrm{Re}(p_1)\right| \qquad \delta = 338.57 \qquad \omega_0 := \left|\mathrm{Im}(p_2)\right| \qquad \omega_0 = 337.55$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \ \text{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} 5.8065 & -5.8065 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = 5.806 \qquad v_1 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \ \text{float}, 5 \ \rightarrow 5.8065 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \text{float}, 4 \ \rightarrow 1.875 + 5.807 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t)$

Для струму i2(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2) \ \text{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} -6.1343 & 6.1343 \\ 1.6258 & -1.5158 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -6.134 \qquad v_2 = 1.626$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow -6.1343 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t + 1.6258)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 1.875 - 6.134 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t + 1.626)$$

Для струму i3(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(C, v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -8.2117 & 8.2117 \\ -2.2997 & .84187 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -8.212$ $\qquad v_3 = -2.3$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow -8.2117 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t - 2.2997)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -8.212 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t - 2.300)$$

Для напруги Uc(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \text{Find}(D, v_C) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -245.37 & 245.37 \\ 1.6258 & -1.5158 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -245.37$ $\qquad v_C = 1.626$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C) \text{ float}, 5 \rightarrow -245.37 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t + 1.6258)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 245. - 245.4 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t + 1.626)$$

Для напруги Ul(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \text{Find}(F, v_L) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -347.01 & 347.01 \\ -.78389 & 2.3577 \end{pmatrix}$$

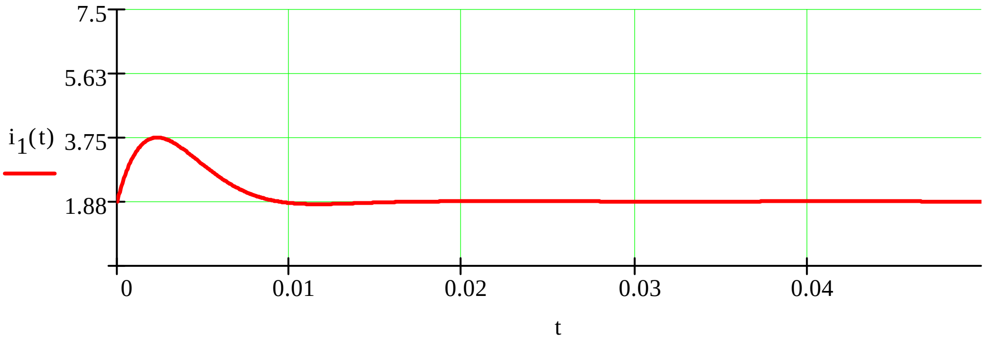
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -347.01$ $\qquad v_L = -0.784$

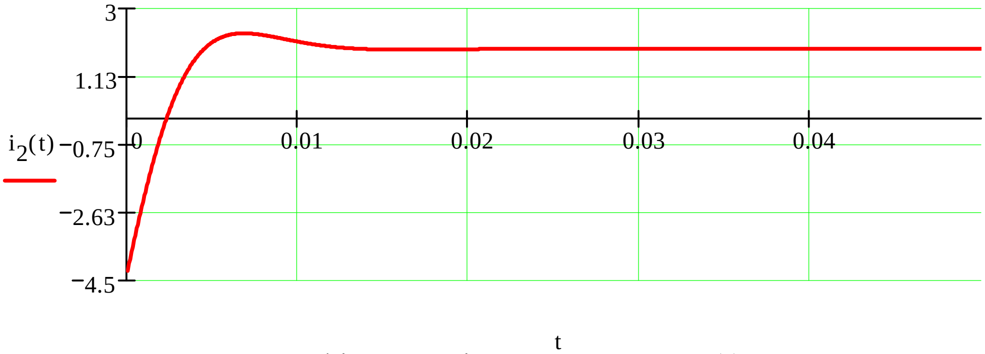
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L) \text{ float}, 5 \rightarrow -347.01 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t - .78389)$$

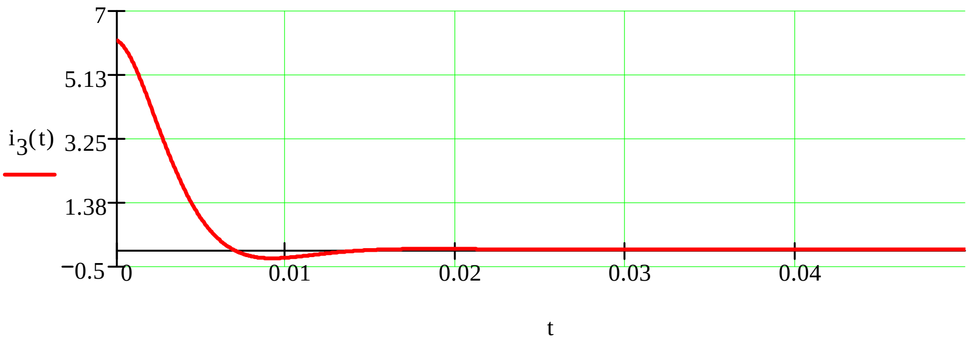
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -347.0 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t - .7839)$$



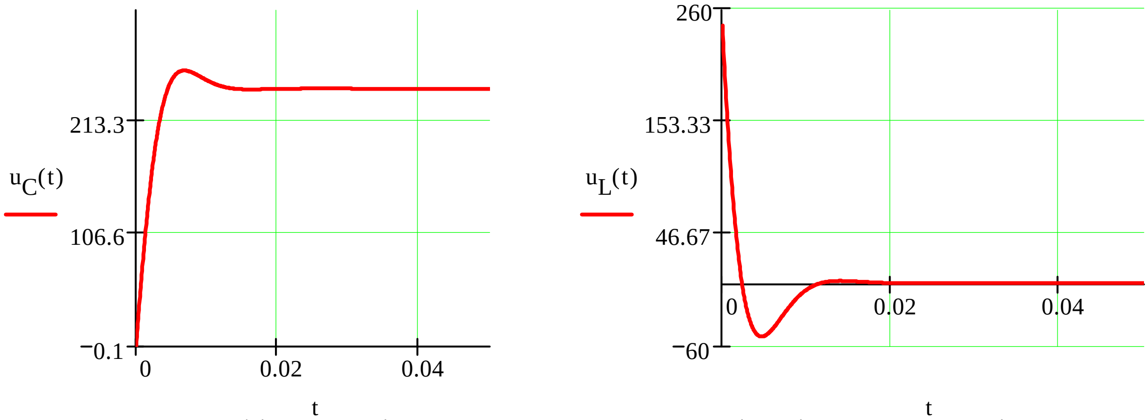
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

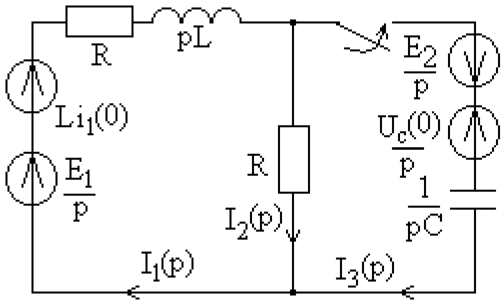


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 1.875$ $\quad i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\quad u_{Cдк} = 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк}$ $\quad i_{L0} = 1.875$

$u_{C0} = 0$

$$I_{k1}(p)\cdot(2R + p\cdot L) - I_{k2}(p)\cdot(R) = \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0}$$

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} 2R + p\cdot L & -(R) \\ -(R) & R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(3385.7\cdot p + 1.1429\cdot 10^6 + 5.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}}$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0} & -(R) \\ \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(16148.\cdot p + 2.1429\cdot 10^6 + 9.3750\cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} 2R + p\cdot L & \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0} \\ -(R) & \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{(19600. + 30.625\cdot p)}{p^{1.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(16148.\cdot p + 2.1429\cdot 10^6 + 9.3750\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(3385.7\cdot p + 1.1429\cdot 10^6 + 5.0000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_3(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{(19600. + 30.625\cdot p)}{\left(3385.7\cdot p + 1.1429\cdot 10^6 + 5.0000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_2(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{matrix}\right. \rightarrow -2.5000000000000000000\cdot\frac{\left(13808.\cdot p - 8571600. + 85.\cdot p^2\right)}{p\cdot\left(33857.\cdot p + 11429000. + 50.\cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_{k1}(p) - L\cdot i_{1дк} \text{ factor } \rightarrow 1715\cdot\frac{p}{\left(1600000 + 7\cdot p^2 + 4740\cdot p\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p\cdot C} \text{ factor } \rightarrow 4375000\cdot\frac{(640+p)}{\left(33857\cdot p + 11429000 + 50\cdot p^2\right)\cdot p}$$

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

$$N_1(p) := 16148.\cdot p + 2.1429\cdot 10^6 + 9.3750\cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(3385.7\cdot p + 1.1429\cdot 10^6 + 5.0000\cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \;\left|\begin{matrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -338.57 - 337.57\cdot i \\ -338.57 + 337.57\cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -338.57 - 337.57i \qquad p_2 = -338.57 + 337.57i$$

$$N_1(p_0) = 2.143\times 10^6 \qquad N_1(p_1) = -3.318\times 10^6 - 3.308i\times 10^6 \qquad N_1(p_2) = -3.318\times 10^6 + 3.308i\times 10^6$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p) \;\left|\begin{matrix}\text{factor} \\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow 6771.4\cdot p + 1.1429\cdot 10^6 + 15.\cdot p^{2.}$$

$$dM_1(p_0) = 1.143\times 10^6 \quad dM_1(p_1) = -1.14\times 10^6 + 1.143i\times 10^6 \qquad dM_1(p_2) = -1.14\times 10^6 - 1.143i\times 10^6$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad i_1(0) = 1.875$$

$$i_1(t) \;\left|\begin{matrix}\text{float}, 5 \\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow 1.8750 + 9.8768\cdot 10^{-5}\cdot\exp(-338.57\cdot t)\cdot\cos(337.57\cdot t) + 5.8062\cdot\exp(-338.57\cdot t)\cdot\sin(337.57\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 4375000\cdot(640+p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(33857\cdot p + 11429000 + 50\cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \;\left|\begin{matrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -338.57 + 337.57\cdot i \\ -338.57 - 337.57\cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -338.57 + 337.57i \qquad p_2 = -338.57 - 337.57i$$

$$N_u(p_0) = 2.8\times 10^9 \qquad N_u(p_1) = 1.319\times 10^9 + 1.477i\times 10^9 \qquad N_u(p_2) = 1.319\times 10^9 - 1.477i\times 10^9$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp}M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 67714\cdot p + 11429000 + 150\cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 1.143\times 10^7 \qquad dM_u(p_1) = -1.14\times 10^7 - 1.143i\times 10^7 \qquad dM_u(p_2) = -1.14\times 10^7 + 1.143i\times 10^7$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = 5.157\times 10^{-3}$$

$$u_C(t) \;\left|\begin{matrix}\text{float}, 5 \\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow 244.99 - 244.98\cdot\exp(-338.57\cdot t)\cdot\cos(337.57\cdot t) + 13.4940\cdot\exp(-338.57\cdot t)\cdot\sin(337.57\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := 1715p$ $\qquad$ $M_L(p) := 1600000 + 7 \cdot p^2 + 4740 \cdot p$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -338.57 + 337.56 \cdot i \\ -338.57 - 337.56 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_1 = -338.57 + 337.56i$ $\qquad$ $p_2 = -338.57 - 337.56i$

$N_L(p_1) = -5.806 \times 10^5 + 5.789i \times 10^5$ $\qquad$ $N_L(p_2) = -5.806 \times 10^5 - 5.789i \times 10^5$

$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 14 \cdot p + 4740$

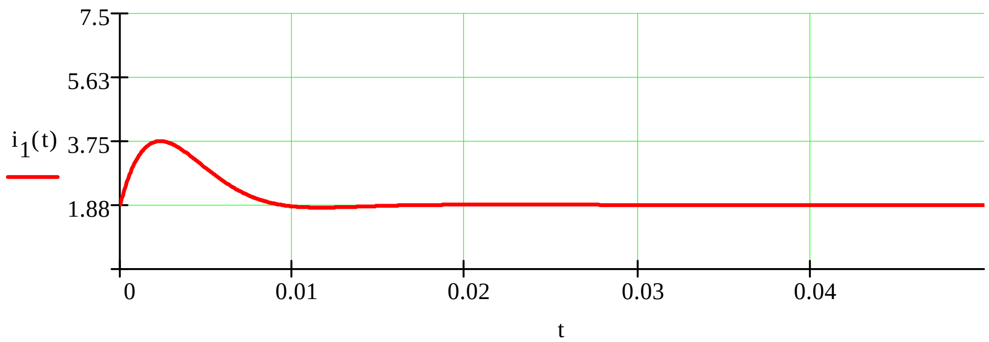
$dM_L(p_1) = 0.02 + 4.726i \times 10^3$ $\qquad$ $dM_L(p_2) = 0.02 - 4.726i \times 10^3$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

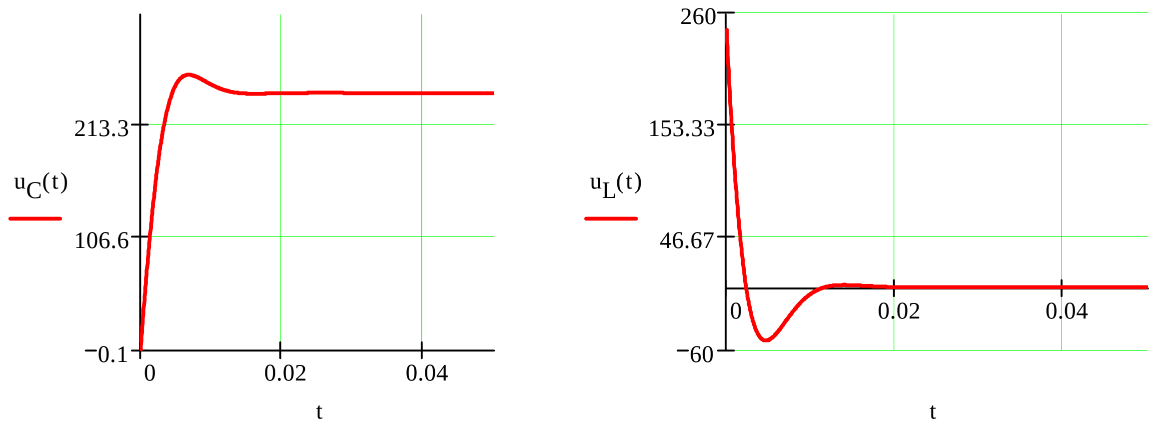
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t}$$

$u_L(0) = 244.999$

$$u_L(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow 245.00 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \cos(337.56 \cdot t) - 245.74 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.56 \cdot t)$$

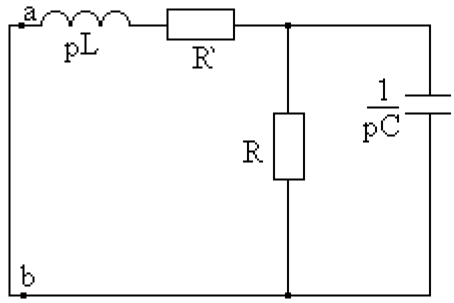


Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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



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

$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right) \cdot (R' + p \cdot L) + \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R}$$

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

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|\begin{matrix} solve, R' \\ float, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -39.873 \\ 129.16 \end{pmatrix}$$

В схемі з данними параметрами перехід з аперіодичного процесу у коливальний буде при: $R' := 129.16$

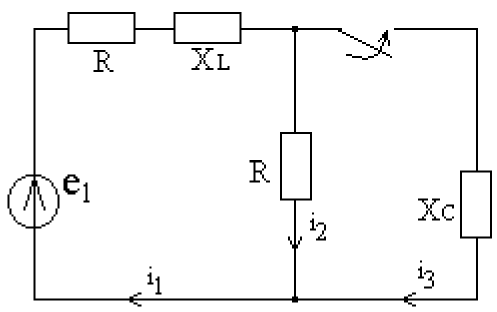
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 71.429 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 25$$

$$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_1 = 38.823 + 144.889i \qquad F(E_1) = (150 \quad 75)$$

$$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_2 = 43.999 + 164.207i \qquad F(E_2) = (170 \quad 75)$$

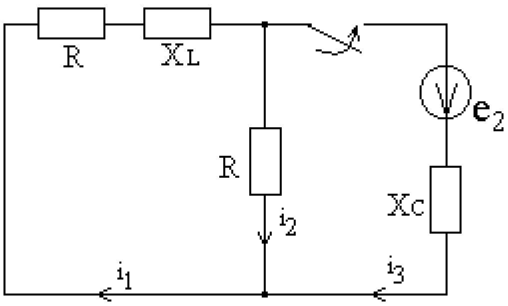


$$Z'_{vx} := i \cdot X_L + R + \frac{R \cdot (-X_C \cdot i)}{R - X_C \cdot i} \qquad Z'_{vx} = 70.451 + 7.948i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.773 + 1.969i \qquad F(I'_{1дк}) = (2.116 \quad 68.564)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{-X_C \cdot i}{R - X_C \cdot i} \qquad I'_{2дк} = 1.428 + 1.17i \qquad F(I'_{2дк}) = (1.846 \quad 39.315)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = -0.655 + 0.8i \qquad F(I'_{3дк}) = (1.034 \quad 129.315)$$



$$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(i \cdot X_L + R) \cdot R}{2R + i \cdot X_L} \qquad Z''_{vx} = 21.779 - 65.735i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = -2.051 + 1.349i \qquad F(I''_{3дк}) = (2.455 \;\; 146.669)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{R}{2R + i \cdot X_L} \qquad I''_{1дк} = -0.742 + 0.906i \qquad F(I''_{1дк}) = (1.172 \;\; 129.315)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = -1.309 + 0.442i \qquad F(I''_{2дк}) = (1.382 \;\; 161.32)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 0.031 + 2.876i \qquad F(I_{1дк}) = (2.876 \;\; 89.384)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.119 + 1.612i \qquad F(I_{2дк}) = (1.616 \;\; 85.765)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 1.396 - 0.549i \qquad F(I_{3дк}) = (1.5 \;\; -21.471)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = -39.224 - 99.724i \qquad F(u_{Cдк}) = (107.161 \;\; -111.471)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -71.895 + 0.773i \qquad F(u_{Lдк}) = (71.899 \;\; 179.384)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -141.032$

$i_{Lдк}(0) = 4.067$

Given

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

$$e_1(0) = u_{L0} + i_{10} \cdot R + i_{20} \cdot R$$

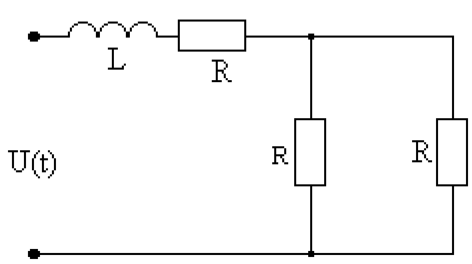
$$e_2(0) = -i_{20} \cdot 2 \cdot R + u_{C0}$$

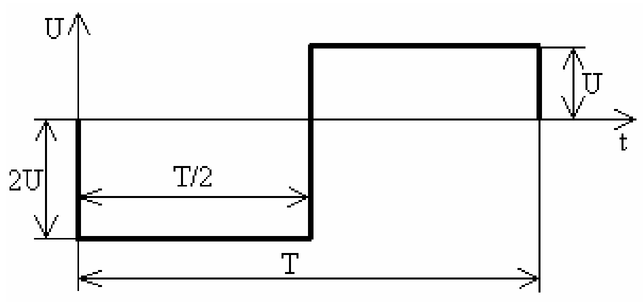
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 4.067$ $\quad i_{20} = -4.666$ $\quad i_{30} = 8.733$ $\quad u_{L0} = 228.852$ $\quad u_{C0} = -141.032$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.75 \qquad E_1 := 150 \qquad E := 1$





За допомогою класичного метода визначим:

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

$p := 1.5 \cdot R + p \cdot L \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow -480. \qquad p = -480 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 1.563 \times 10^{-3}$

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

$U_L(t) := L \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-480. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.6667 \cdot 10^{-2} - 1.6667 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-480. \cdot t)$

$h_{uL}(t) := U_L(t) \rightarrow 1.0000 \cdot \exp(-480. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := -2E_1 \qquad U_0 = -300$

$U_1 := -2E_1 \qquad U_1 = -300 \qquad 0 < t < \frac{T}{2}$

$U_2 := E_1 \qquad U_2 = 150 \qquad \frac{T}{2} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow -5. + 5. \cdot \exp(-480. \cdot t)$

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

$i_2(t) \text{ float}, 3 \rightarrow 2.50 + 5.00 \cdot \exp(-480. \cdot t) - 7.50 \cdot \exp(-480. \cdot t + .375)$

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

$i_3(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow 5. \cdot \exp(-480. \cdot t) - 7.50 \cdot \exp(-480. \cdot t + .375) + 2.50 \cdot \exp(-480. \cdot t + .750)$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -300.00 \cdot \exp(-480. \cdot t)$

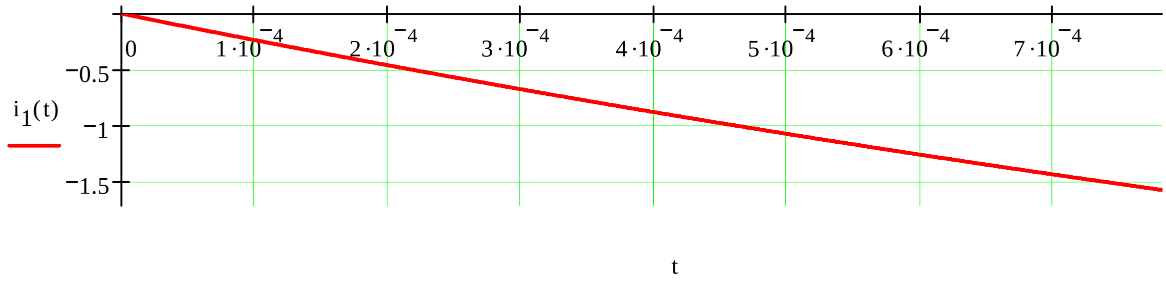
$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$

$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -300.00 \cdot \exp(-480. \cdot t) + 450.00 \cdot \exp(-480. \cdot t + .37500)$

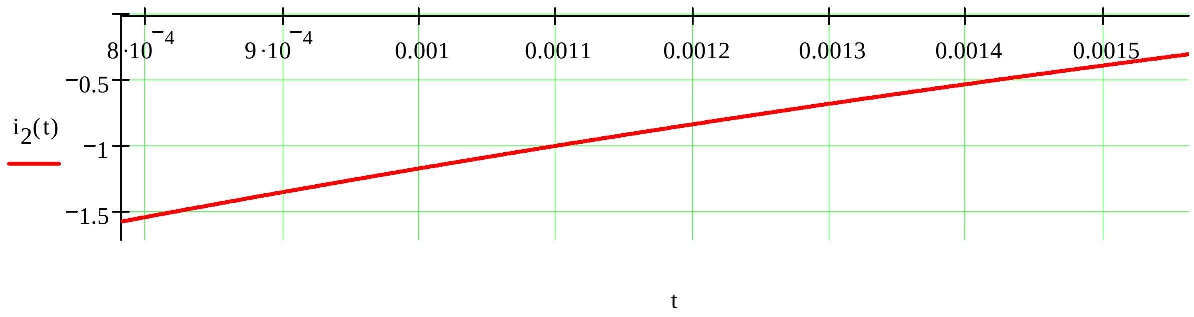
$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$

$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -300.00 \cdot \exp(-480. \cdot t) + 450.00 \cdot \exp(-480. \cdot t + .37500) - 150.00 \cdot \exp(-480. \cdot t + .75000)$

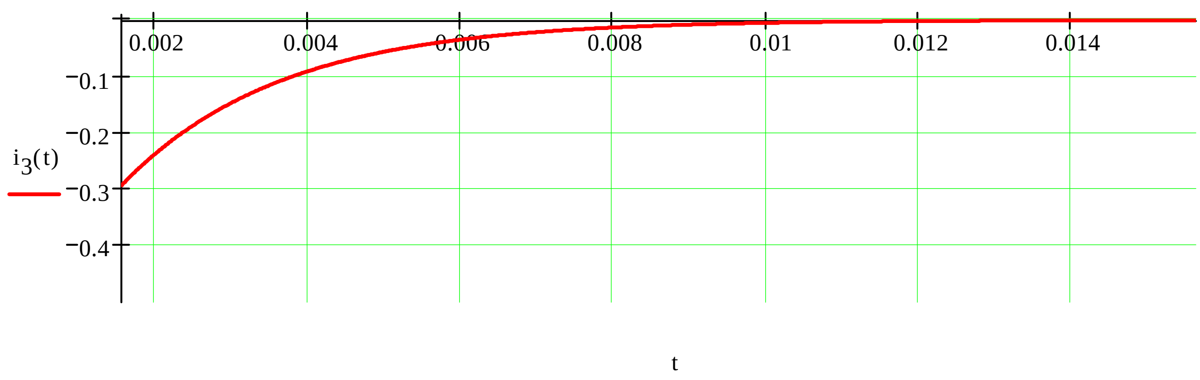
На промежутке от 0 до 2T/3



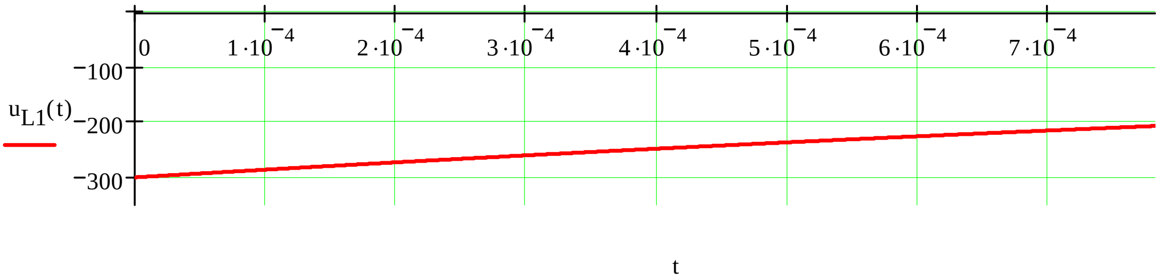
На промежутке от 2T/3 до T



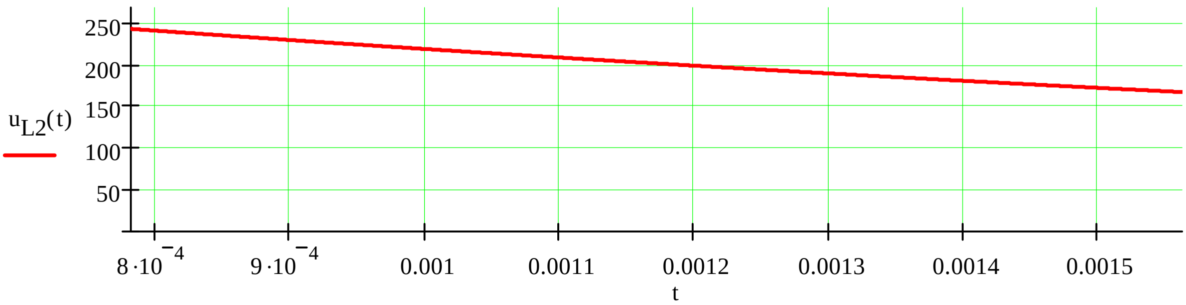
На промежутке от T до 10T



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от 0 до 2T/3



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от 2T/3 до T



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