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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 3213

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.

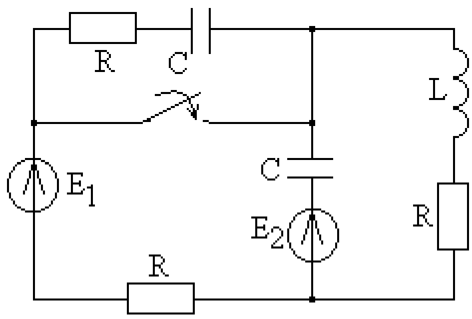
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

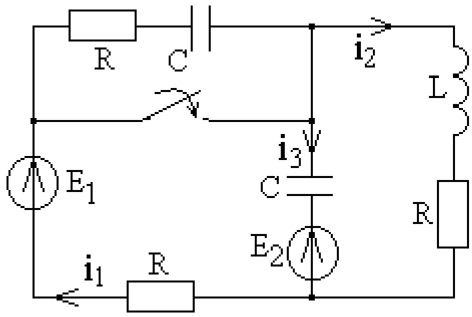
Вхідні данні:

$L := 0.2$ Гн $C := 200 \cdot 10^{-6}$ Ф $R := 50$ Ом

$E_1 := 80$ В $E_2 := 130$ В $\psi := 135 \cdot deg$ C^0 $\omega := 150$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $\quad\quad$ $i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad$ $i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2$ $\quad\quad$ $u_{Cдк} = -130$ $\quad\quad$ $u_{Lдк} := 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad\quad$ $i'_2 := i'_1$ $\quad\quad$ $i'_2 = 0.8$

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

$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad\quad$ $u'_C = -90$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad\quad$ $i_{20} = 0$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad\quad$ $u_{C0} = -130$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$E_2 = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.600000 \\ 1.600000 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 1.6$ $\quad\quad$ $i_{30} = 1.6$ $\quad\quad$ $u_{L0} = 0$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\quad\quad$ $di_{20} = 0$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\quad\quad$ $du_{C0} = 8 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$0 = di_{20} \cdot R + du_{L0} - du_{C0}$

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(di_{10}, di_{30}, du_{L0}\right)$$

$di_{10} = -160$ $di_{30} = -160$ $du_{L0} = 8 \times 10^{3}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \ \begin{vmatrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -175. - 139.19 \cdot i \\ -175. + 139.19 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -175 - 139.19i$ $p_2 = -175 + 139.19i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := \left|\mathrm{Re}\left(p_1\right)\right|$ $\delta = 175$ $\omega_0 := \left|\mathrm{Im}\left(p_2\right)\right|$ $\omega_0 = 139.19$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

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

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

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

Визначення сталих інтегрування:

Для струму i1(t):

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(A, v_1\right) \ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} -.81280 & .81280 \\ -1.3931 & 1.7485 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -0.813$ $v_1 = -1.393$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_1\right) \ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow -.81280 \cdot \exp(-175.00 \cdot t) \cdot \sin(139.19 \cdot t - 1.3931)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \mathrm{float}, 4 \ \rightarrow .8000 - .8128 \cdot \exp(-175.0 \cdot t) \cdot \sin(139.2 \cdot t - 1.393)$

Для струму i2(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} 1.2852 & -1.2852 \\ -2.4697 & .67191 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = 1.285$ $\qquad v_2 = -2.47$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 1.2852\cdot\exp(-175.00\cdot t)\cdot\sin(139.19\cdot t - 2.4697)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow .8000 + 1.285\cdot\exp(-175.0\cdot t)\cdot\sin(139.2\cdot t - 2.470)$

Для струму i3(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.8175 & 1.8175 \\ -2.0650 & 1.0766 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -1.817$ $\qquad v_3 = -2.065$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -1.8175\cdot\exp(-175.00\cdot t)\cdot\sin(139.19\cdot t - 2.0650)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -1.818\cdot\exp(-175.0\cdot t)\cdot\sin(139.2\cdot t - 2.065)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -40.640 & 40.640 \\ 1.7485 & -1.3931 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -40.64$ $\qquad v_C = 1.748$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -40.640\cdot\exp(-175.00\cdot t)\cdot\sin(139.19\cdot t + 1.7485)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -90. - 40.64\cdot\exp(-175.0\cdot t)\cdot\sin(139.2\cdot t + 1.749)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 57.475 & -57.475 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

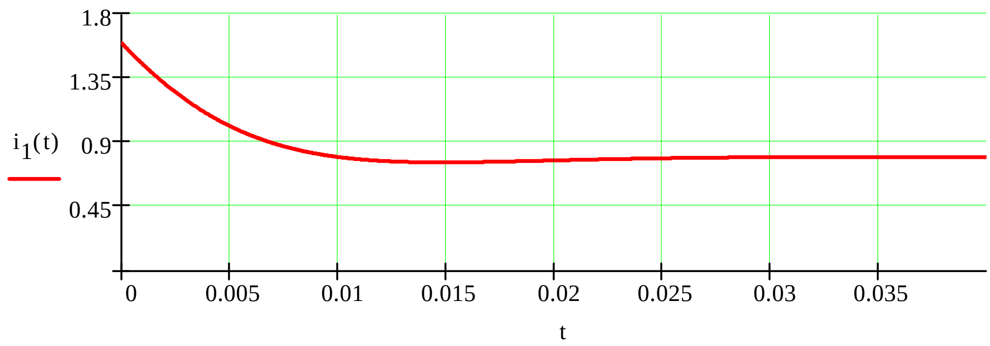
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = 57.475$ $\qquad v_L = 0$

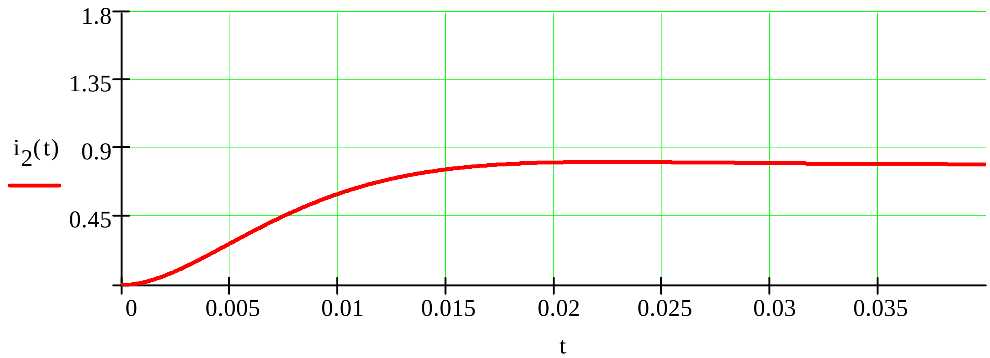
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 57.475\cdot\exp(-175.00\cdot t)\cdot\sin(139.19\cdot t)$

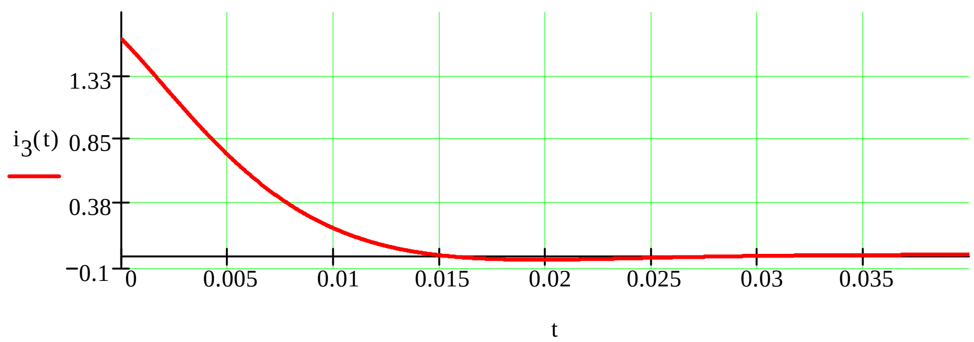
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 57.48\cdot\exp(-175.0\cdot t)\cdot\sin(139.2\cdot t)$



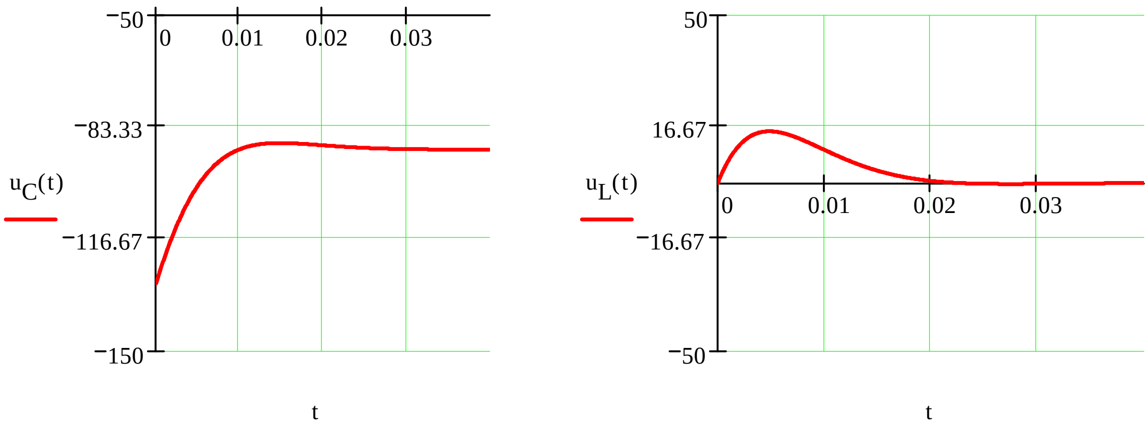
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

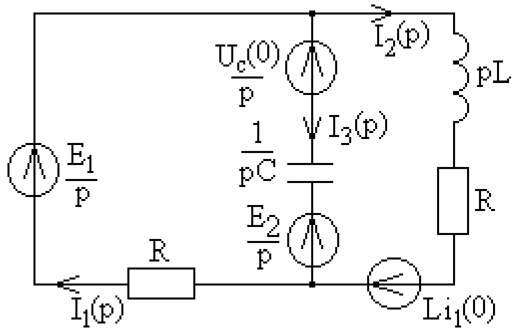


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $i_{2дк} := i_{1дк}$ $i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2$ $u_{Cдк} = -130$ $u_{Lдк} := -u_{Cдк} + E_2$ $u_{Lдк} = 260$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк}$ $i_{L0} = 0$

$u_{C0} = -130$

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

$$-I_{k1}(p)\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) + I_{k2}(p)\cdot\left(p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C}\right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20}$$

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float},5 \;\rightarrow \frac{1}{p^{1.}}\cdot\left(3500.0\cdot p + 10.0\cdot p^{2.} + 5.0000\cdot 10^{5}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float},5 \;\rightarrow \frac{80.}{p^{1.}}\cdot\left(50. + .2\cdot p + \frac{5000.}{p^{1.}}\right)$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float},5 \;\rightarrow \frac{4.0000\cdot 10^{5}}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \left|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix}\right. \rightarrow 1.6000000000000000000 \cdot \frac{(250.\cdot p + p^2 + 25000.)}{p\cdot(50000. + 350.\cdot p + p^2)}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p) \ \text{float}, 5 \ \rightarrow \frac{4.0000\cdot 10^5}{p^{1.}\cdot(3500.0\cdot p + 10.0\cdot p^{2.} + 5.0000\cdot 10^5)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix}\right. \rightarrow 1.6000000000000000000 \cdot \frac{(250. + p)}{(50000. + 350.\cdot p + p^2)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2дк}$$

$$u_L(p) \ \text{factor} \ \rightarrow \frac{8000}{(50000 + 350\cdot p + p^2)}$$

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

$$N_1(p) := 1.6000000000000000000\cdot(250.\cdot p + p^2 + 25000. \quad M_1(p) := p\cdot(50000. + 350.\cdot p + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p) \left|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -175. - 139.19\cdot i\\ -175. + 139.19\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -175 - 139.19i \qquad p_2 = -175 + 139.19i$$

$$N_1(p_0) = 4\times 10^4 \qquad N_1(p_1) = -1.2\times 10^4 + 2.227i\times 10^4 \qquad N_1(p_2) = -1.2\times 10^4 - 2.227i\times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p) \left|\begin{matrix}\text{factor}\\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow 50000. + 700.\cdot p + 3.\cdot p^{2.}$$

$$dM_1(p_0) = 5\times 10^4 \qquad dM_1(p_1) = -3.875\times 10^4 + 4.872i\times 10^4 \qquad dM_1(p_2) = -3.875\times 10^4 - 4.872i\times 10^4$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \ \text{float}, 4 \ \rightarrow .8000 + (.4000 - 7.185\cdot 10^{-2}\cdot i)\cdot \exp[(-175. - 139.2\cdot i)\cdot t] + (.4000 + 7.185\cdot 10^{-2}\cdot i)\cdot \exp[(-175. + 139.2\cdot i)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 8000 \qquad M_L(p) := 50000 + 350\cdot p + p^2$$

$$\begin{pmatrix} p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_L(p) \left|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -175. + 139.20\cdot i\\ -175. - 139.20\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_1 = -175 + 139.2i \qquad p_2 = -175 - 139.2i$$

$$N_L(p_1) = 8\times 10^3 \qquad N_L(p_2) = 8\times 10^3$$

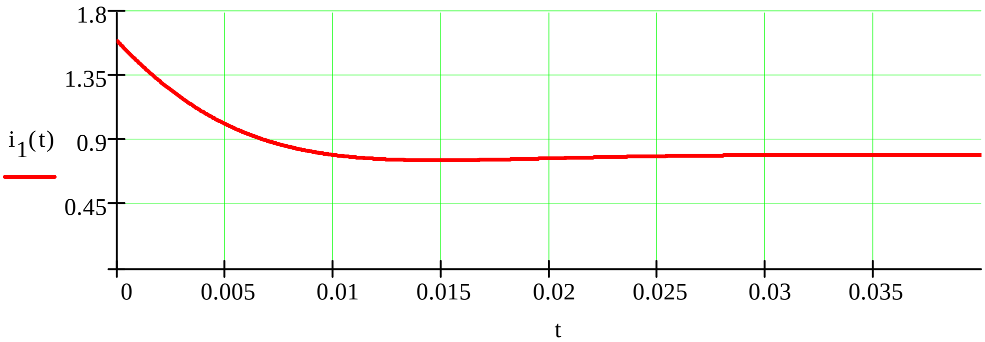
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p) \ \text{factor} \ \rightarrow 350 + 2\cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 278.4i \qquad dM_L(p_2) = -278.4i$$

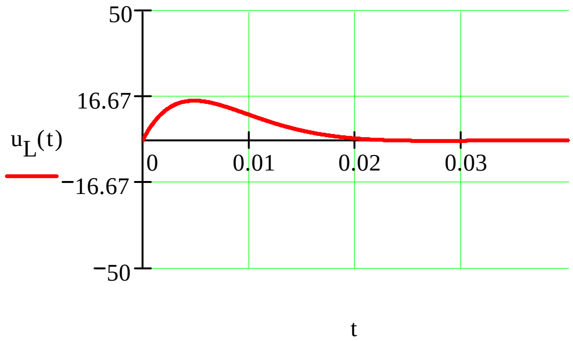
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

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

$$u_L(t) \text{ float}, 3 \;\rightarrow -28.7 \cdot i \cdot \exp[(-175. + 139. \cdot i) \cdot t] + 28.7 \cdot i \cdot \exp[(-175. - 139. \cdot i) \cdot t]$$

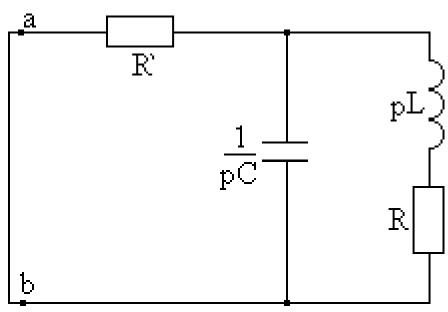


Графік перехідного струму i1(t).



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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -75.497 \\ 8.8304 \end{pmatrix}$$

$$R'_1 := 8.8304$$

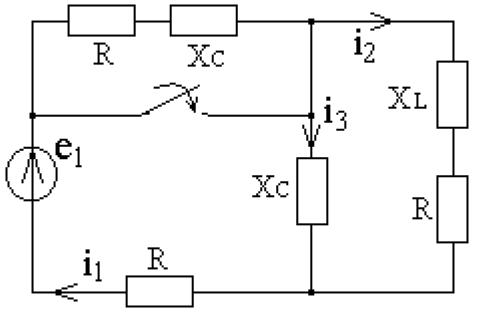
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$X_C := \dfrac{1}{\omega\cdot C}$ $\qquad X_C = 33.333$ $\qquad X_L := \omega\cdot L$ $\qquad X_L = 30$

$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\qquad E_1 = -56.569 + 56.569i$ $\qquad F(E_1) = (80\ \ 135)$

$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\qquad E_2 = -91.924 + 91.924i$ $\qquad F(E_2) = (130\ \ 135)$

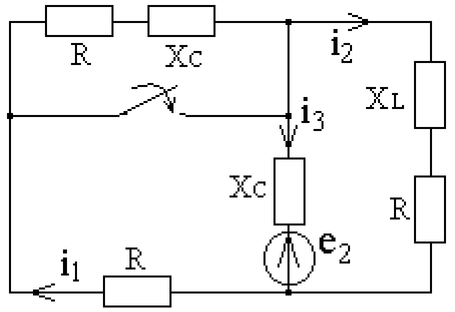


$Z'_{vx} := 2\cdot R - i\cdot X_C + \dfrac{(R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\qquad Z'_{vx} = 122.124 - 65.192i$

$I'_{1дк} := \dfrac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad I'_{1дк} = -0.553 + 0.168i$ $\qquad F(I'_{1дк}) = (0.578\ \ 163.094)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\dfrac{(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\qquad I'_{2дк} = 0.087 + 0.374i$ $\qquad F(I'_{2дк}) = (0.384\ \ 76.908)$

$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$ $\qquad I'_{3дк} = -0.64 - 0.206i$ $\qquad F(I'_{3дк}) = (0.672\ \ -162.128)$



$Z''_{vx} := -X_C\cdot i + \dfrac{(R + i\cdot X_L)\cdot(2\cdot R - i\cdot X_C)}{R + i\cdot X_L + R + R - i\cdot X_C}$ $\qquad Z''_{vx} = 39.783 - 23.56i$

$I''_{3дк} := \dfrac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\qquad I''_{3дк} = -2.724 + 0.698i$ $\qquad F(I''_{3дк}) = (2.812\ \ 165.635)$

$I''_{1дк} := I''_{3дк}\cdot\dfrac{(R + i\cdot X_L)}{R + i\cdot X_L + R + R - i\cdot X_C}$ $\qquad I''_{1дк} = -1.04 - 0.335i$ $\qquad F(I''_{1дк}) = (1.093\ \ -162.128)$

$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк}$ $\qquad I''_{2дк} = -1.684 + 1.033i$ $\qquad F(I''_{2дк}) = (1.975\ \ 148.473)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\quad I_{1дк} = -1.593 - 0.167i$ $\quad F(I_{1дк}) = (1.602 \;\; -174.005)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\quad I_{2дк} = -1.597 + 1.407i$ $\quad F(I_{2дк}) = (2.128 \;\; 138.607)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\quad I_{3дк} = 2.084 - 0.904i$ $\quad F(I_{3дк}) = (2.271 \;\; -23.451)$

$u_{Cдк} := I_{3дк}\cdot(-i\cdot X_C)$ $\quad u_{Cдк} = -30.131 - 69.459i$ $\quad F(u_{Cдк}) = (75.713 \;\; -113.451)$

$u_{Lдк} := I_{1дк}\cdot i\cdot X_L$ $\quad u_{Lдк} = 5.019 - 47.787i$ $\quad F(u_{Lдк}) = (48.05 \;\; -84.005)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -98.23$

$i_{20} = 1.99$

Given

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

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

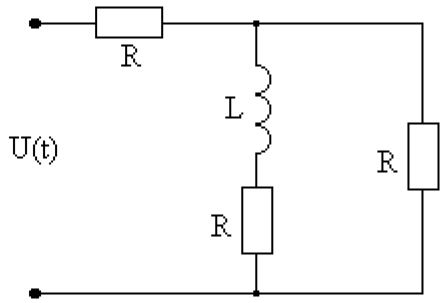
$$e_2(0) = i_{20}\cdot R + u_{L0} - u_{C0}$$

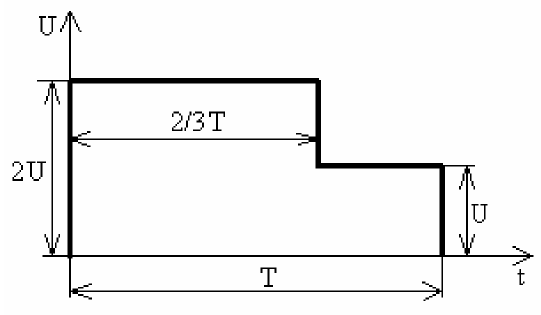
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{30}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 0.965$ $\quad i_{20} = 1.99$ $\quad i_{30} = -1.026$ $\quad u_{L0} = -67.742$ $\quad u_{C0} = -98.23$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.0$ $\qquad E_1 := 80$ $\qquad E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1дк} := \frac{0}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \qquad i_{1дк} = 0$$

$$i_{3дк} := i_{1дк} \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i_{3дк} = 0 \qquad i_{2дк} := i_{1дк} \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i_{2дк} = 0$$

$$u_{Lдк} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \qquad i'_1 = 0.013$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_3 = 6.667 \times 10^{-3} \qquad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_2 = 6.667 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

$$i_{30} := i_{3дк} \qquad i_{30} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E = i_{20} \cdot R + i_{10} \cdot R$$

$$0 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \qquad i_{10} = 0.01 \qquad i_{20} = 0.01 \qquad i_{30} = 0 \qquad u_{L0} = 0.5$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \ \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow -375. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 2.667 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -375$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

$i''_2(t) = B_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Визначення сталих інтегрування:

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

$B_1 := i_{30} - i'_3 \qquad B_1 = -6.667 \times 10^{-3}$

Отже вільна складова струму i1(t) та i3(t) будуть мати вигляд:

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

$i''_3(t) := B_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Повні значення цих струмів:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad i_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \qquad i_3(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} - 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$U_L(t) := L \cdot \frac{d}{dt} i_3(t)$

$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .50000 \cdot \exp(-375. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 2E_1 \qquad U_0 = 160$

$U_1 := 2E_1 \qquad U_1 = 160 \qquad 0 < t < \frac{2T}{3}$

$U_2 := E_1 \qquad U_2 = 80 \qquad \frac{2T}{3} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 2.13 - .533 \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{2T}{3}\right)$

$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 1.0667 - .53333 \cdot \exp(-375. \cdot t) + .26667 \cdot \exp(-375. \cdot t + .66667)$

$i_3(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{2T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot g_{11}(t - T)$

$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -.533 \cdot \exp(-375. \cdot t) + .267 \cdot \exp(-375. \cdot t + .667) + .267 \cdot \exp(-375. \cdot t + 1.)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t)$ float, 5 $\rightarrow 80.000 \cdot \exp(-375. \cdot t)$

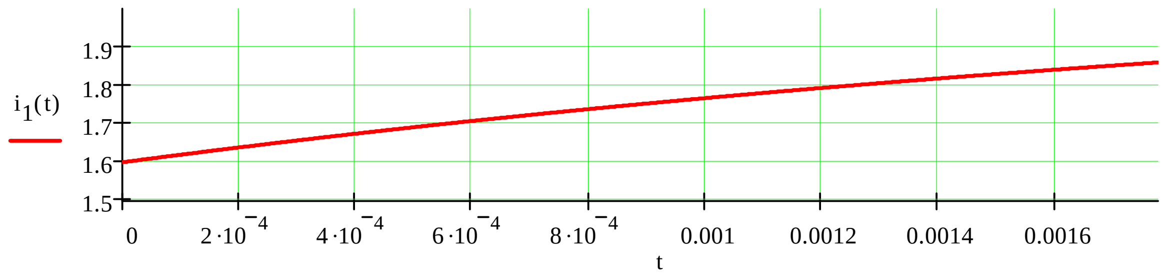
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right)$$

$u_{L2}(t)$ float, 5 $\rightarrow 80.000 \cdot \exp(-375. \cdot t) - 40.000 \cdot \exp(-375. \cdot t + .66667)$

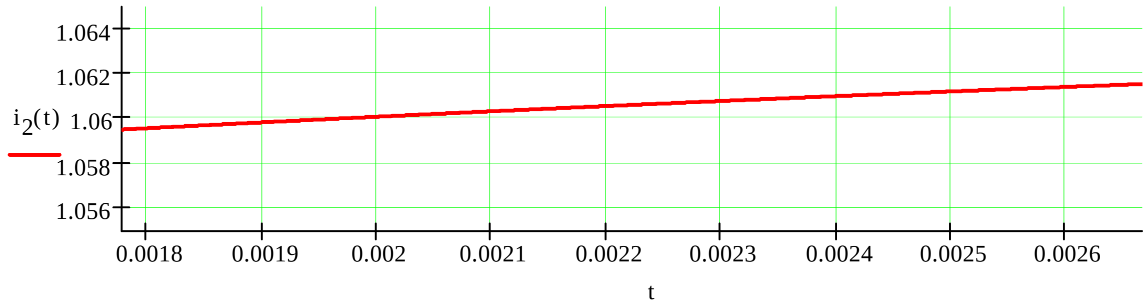
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$u_{L3}(t)$ float, 5 $\rightarrow 80.000 \cdot \exp(-375. \cdot t) - 40.000 \cdot \exp(-375. \cdot t + .66667) - 40.000 \cdot \exp(-375. \cdot t + 1.0000)$

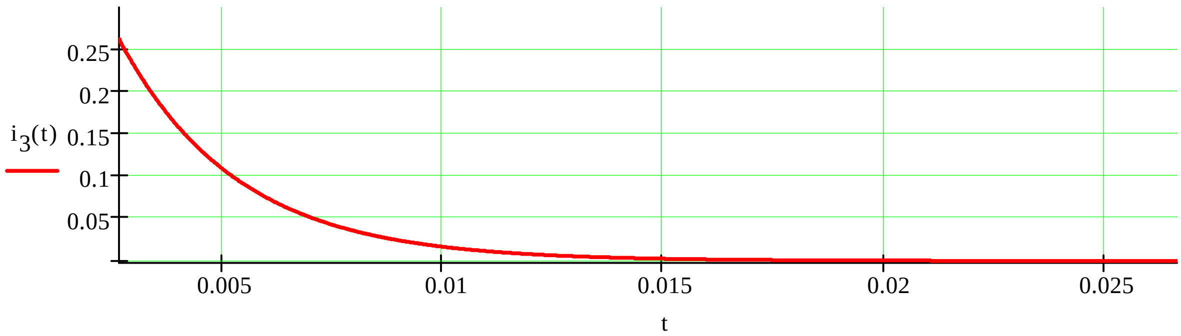
На промежутке от 0 до 2/3T



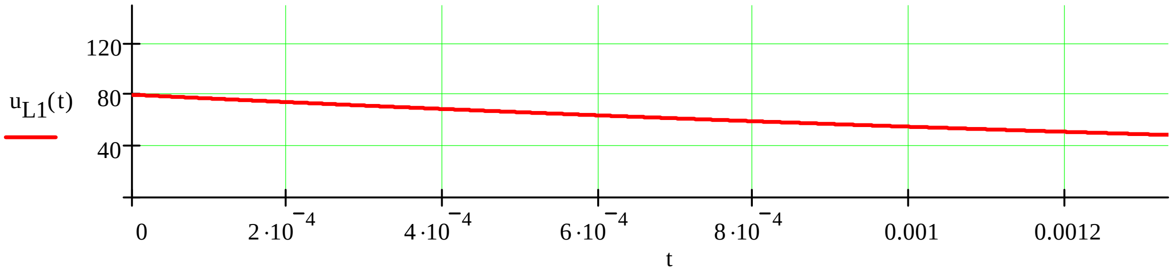
На промежутке от 2/3T до T



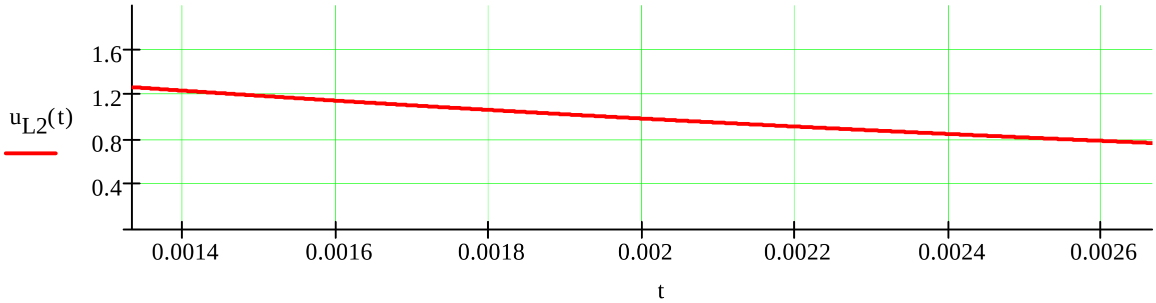
На промежутке от T до 10T



На промежутке от 0 до 2/3T



На промежутке от 2/3T до T



На промежутке от T до 10T