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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 403

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.

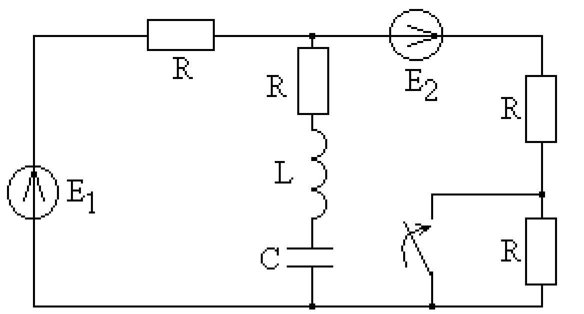
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

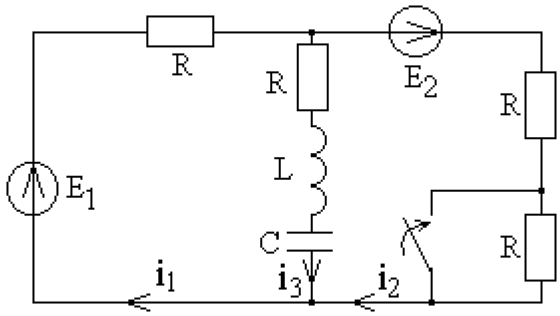
Вхідні данні:

$L := 0.15$ Гн $C := 700 \cdot 10^{-6}$ Ф $R := 50$ Ом

$E_1 := 100$ В $E_2 := 80$ В $\psi := 30 \cdot deg$ C^0 $\omega := 100$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.2$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 40$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R}$ $\quad i'_2 := i'_1$ $\quad i'_2 = 1.8$

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

$u'_C := E_1 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 10$

Незалежні початкові умови

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

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad u_{C0} = 40$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$E_2 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0} - u_{L0}$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0})\ \mathrm{float}, 7 \ \rightarrow \begin{pmatrix} 1.800000 \\ 1.800000 \\ -30. \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 1.8$ $\quad i_{20} = 1.8$ $\quad u_{L0} = -30$

Незалежні початкові умови

$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{30} = -200$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$0 = di_{20} \cdot R - di_{30} \cdot R - du_{C0} - du_{L0}$

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{20} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{10}, di_{20}, du_{L0})$$

$di_{10} = -100$ $\quad di_{20} = 100$ $\quad du_{L0} = 1.5 \times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R \;\Bigg|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -480.17 \\ -19.834 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -480.17$ $\quad p_2 = -19.834$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A_1, A_2) \qquad A_1 = 0.217 \qquad A_2 = -0.217$$

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

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

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.800000 + .2172326 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) - .2172326 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \quad i_1(0) = 1.8$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2) \qquad B_1 = -0.217 \qquad B_2 = 0.217$$

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

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

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow 1.800000 - .2172326 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) + .2172326 \cdot \exp(-19.834 \cdot \qquad i_2(0) = 1.8$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2) \qquad C_1 = 0.434 \qquad C_2 = -0.434$$

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

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

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow .4344653 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) - .4344653 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \qquad i_3(0) = 0$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2) \qquad D_1 = -1.293 \qquad D_2 = 31.293$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow 10. - 1.292578 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) + 31.29258 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \qquad u_C(0) = 40$$

Given

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

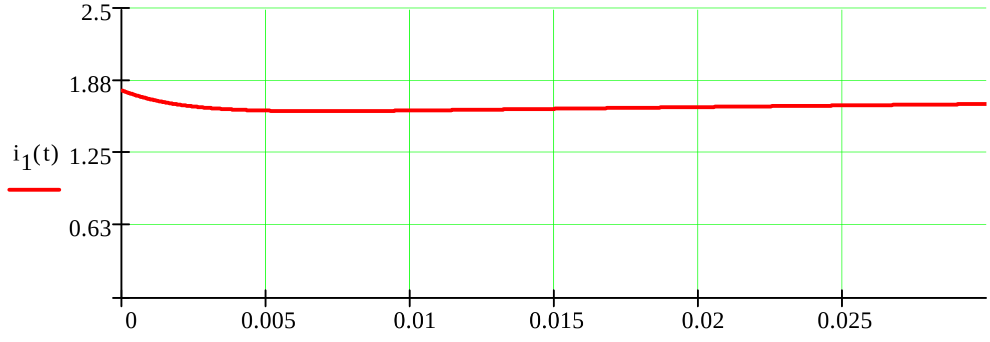
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2) \qquad F_1 = -31.292 \qquad F_2 = 1.292$$

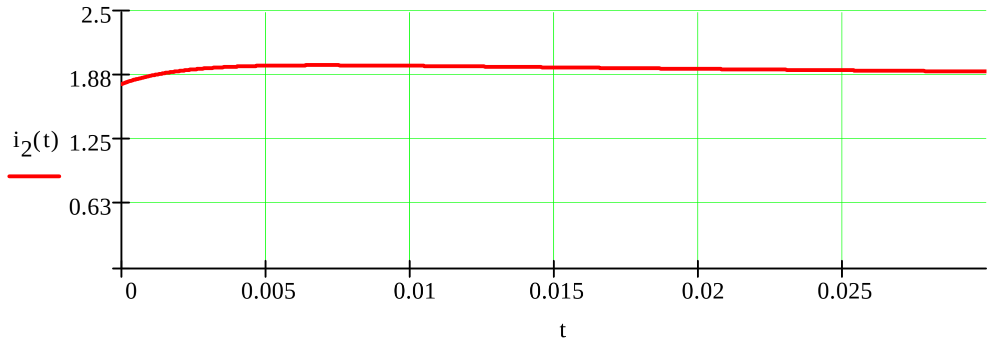
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

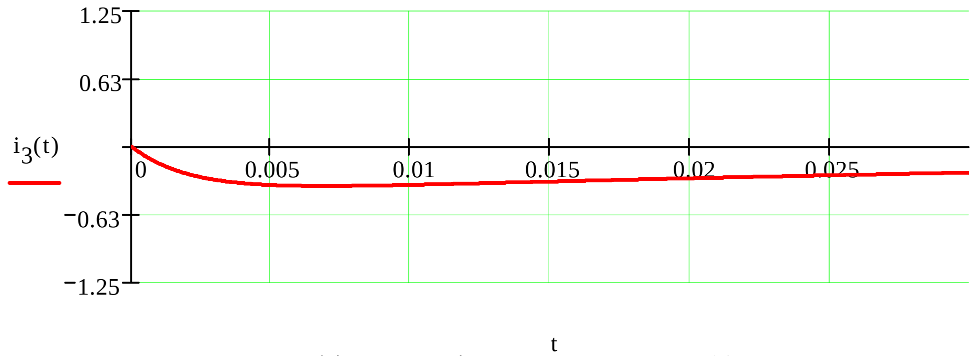
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 7 \ \rightarrow -31.29232 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) + 1.292317 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \qquad u_L(0) = -30$$



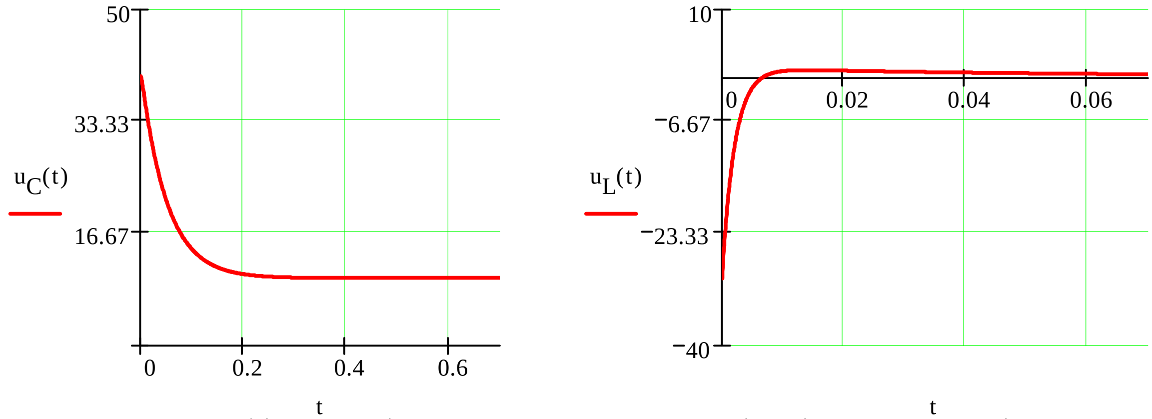
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

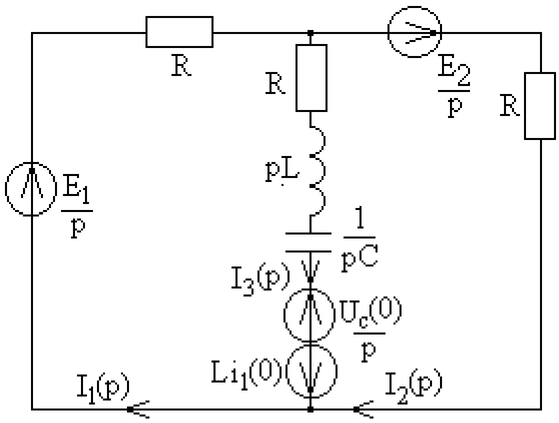


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1 + E_2}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.2$

$i_{3дк} := 0 \quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R \quad u_{Cдк} = 40$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{3дк} \quad i_{L0} = 0$

$u_{C0} = 40$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) - I_{k2}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) = \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) + I_{k2}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R\right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0}$$

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \quad \Delta(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(7500.0 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 15.00 \cdot p^2\right.$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \quad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(2.5714 \cdot 10^5 + 27.00 \cdot p^{2.} + 12000. \cdot p\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} \end{bmatrix}\right| \quad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(2.5714 \cdot 10^5 + 27.00 \cdot p^{2.} + 15000. \cdot p\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(2.5714\cdot 10^5 + 27.00\cdot p^{2.} + 12000.\cdot p\right)}{p^{1.}\cdot\left(7500.0\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 15.00\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(2.5714\cdot 10^5 + 27.00\cdot p^{2.} + 15000.\cdot p\right)}{p^{1.}\cdot\left(7500.0\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 15.00\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{array}\right. \rightarrow \frac{-200.}{\left(500.\cdot p + 9524. + p^2\right)}$$

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

$$u_C(p)\ \text{factor}\ \rightarrow \frac{40}{7}\cdot\frac{\left(3500\cdot p + 16668 + 7\cdot p^2\right)}{\left(500\cdot p + 9524 + p^2\right)\cdot p}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_3(p) - L\cdot i_{3дк}$$

$$u_L(p)\ \text{factor}\ \rightarrow -30\cdot\frac{p}{\left(500\cdot p + 9524 + p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := \left(2.5714\cdot 10^5 + 27.00\cdot p^{2.} + 12000.\cdot p\right) \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(7500.0\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 15.00\cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\-480.17\\-19.835\end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -480.17 \qquad p_2 = -19.835$$

$$N_1(p_0) = 2.571\times 10^5 \qquad N_1(p_1) = 7.203\times 10^5 \qquad N_1(p_2) = 2.974\times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{factor}\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow 15000.\cdot p + 1.4286\cdot 10^5 + 45.\cdot p^{2.}$$

$$dM_1(p_0) = 1.429\times 10^5 \quad dM_1(p_1) = 3.316\times 10^6 \qquad dM_1(p_2) = -1.37\times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t}\ \text{float},3\ \rightarrow 1.80 + .217\cdot\exp(-480.\cdot t) - .217\cdot\exp(-19.8\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := \frac{40}{7}\cdot\left(3500\cdot p + 16668 + 7\cdot p^2\right) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(500\cdot p + 9524 + p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_0\\p_1\\p_2\end{pmatrix} := M_u(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{solve},p\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}0\\-19.84\\-480.16\end{pmatrix} \qquad p_0 = 0 \qquad p_1 = -19.84 \qquad p_2 = -480.16$$

$N_u(p_0) = 9.525 \times 10^4$ $\quad N_u(p_1) = -2.858 \times 10^5$ $\quad N_u(p_2) = -2.858 \times 10^5$

$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 1000 \cdot p + 9524 + 3 \cdot p^2$

$dM_u(p_0) = 9.524 \times 10^3$ $\quad dM_u(p_1) = -9.135 \times 10^3$ $\quad dM_u(p_2) = 2.21 \times 10^5$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 39.994$$

$u_C(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 10.001 + 31.287 \cdot \exp(-19.84 \cdot t) - 1.2931 \cdot \exp(-480.16 \cdot t)$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := -30 \cdot p$ $\quad M_L(p) := 500 \cdot p + 9524 + p^2$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -19.84 \\ -480.16 \end{pmatrix} \qquad p_1 = -19.84 \qquad p_2 = -480.16$$

$N_L(p_1) = 595.2$ $\quad N_L(p_2) = 1.44 \times 10^4$

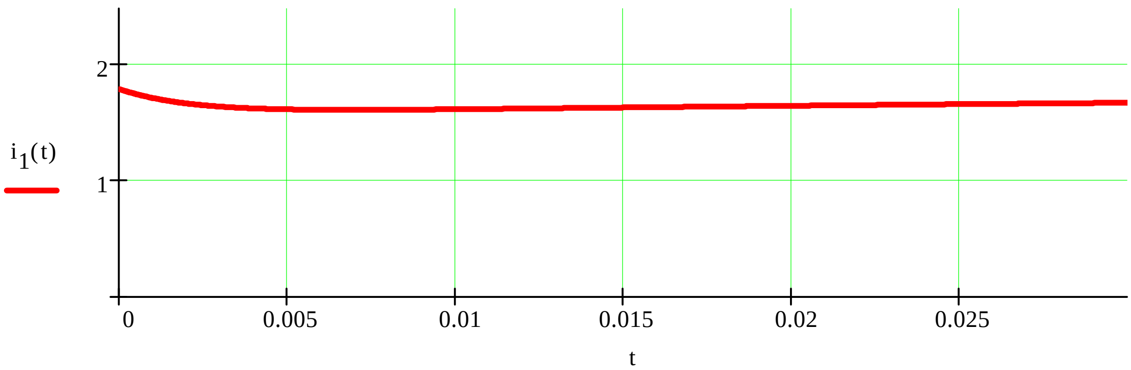
$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 500 + 2 \cdot p$

$dM_L(p_1) = 460.32$ $\quad dM_L(p_2) = -460.32$

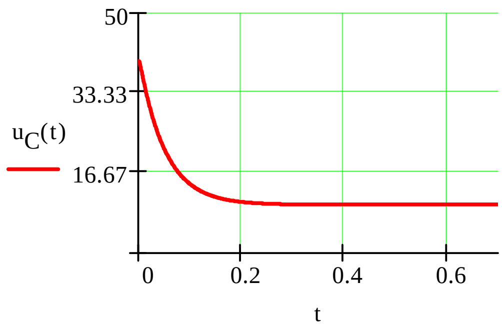
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

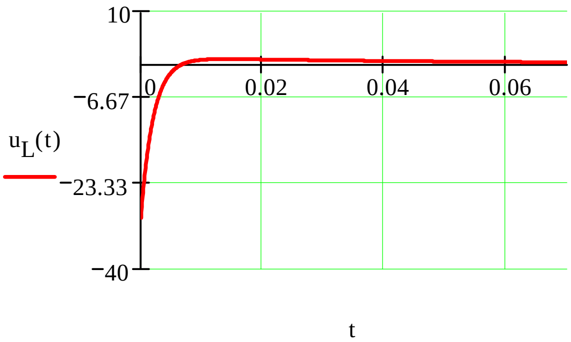
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = -30$$

$u_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.2930 \cdot \exp(-19.84 \cdot t) - 31.293 \cdot \exp(-480.16 \cdot t)$



Графік перехідного струму i1(t).

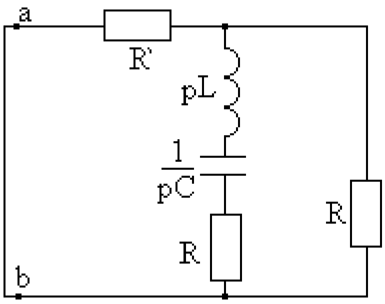




Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2\cdot R\cdot R' + R^2\right)^2 - 4\cdot(R'\cdot L + R\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right)\ \Bigg|\begin{array}{l}\text{solve}, R'\\ \text{float}, 5\end{array} \rightarrow \begin{pmatrix}-30.662\\ -14.651\end{pmatrix}$$

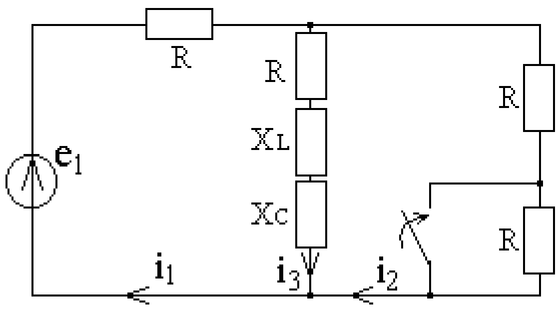
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C} \qquad X_C = 14.286 \qquad X_L := \omega\cdot L \qquad X_L = 15$$

$$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i} \qquad E_1 = 86.603 + 50i \qquad F(E_1) = (100\ \ 30)$$

$$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i} \qquad E_2 = 69.282 + 40i \qquad F(E_2) = (80\ \ 30)$$

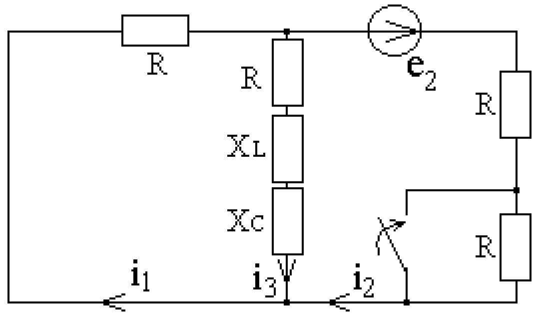


$$Z'_{vx} := R + \frac{2\cdot R\cdot\left(R + X_L\cdot i - i\cdot X_C\right)}{2\cdot R + R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 83.335 + 0.317i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 1.041 + 0.596i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.2\ \ 29.782)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{\left(R + X_L\cdot i - i\cdot X_C\right)}{2\cdot R + R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.345 + 0.202i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.4\ \ 30.327)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = 0.696 + 0.394i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.8\ \ 29.509)$$



$Z''_{vx} := R + R + \frac{(R + i \cdot X_L - X_C \cdot i) \cdot R}{R + i \cdot X_L - X_C \cdot i + R}$ $\qquad Z''_{vx} = 125.001 + 0.179i$

$I''_{2дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\qquad I''_{2дк} = 0.555 + 0.319i$ $\qquad F(I''_{2дк}) = (0.64 \quad 29.918)$

$I''_{1дк} := I''_{2дк} \cdot \frac{(R + X_L \cdot i - X_C \cdot i)}{R + i \cdot X_L - X_C \cdot i + R}$ $\qquad I''_{1дк} = 0.276 + 0.162i$ $\qquad F(I''_{1дк}) = (0.32 \quad 30.327)$

$I''_{3дк} := I''_{2дк} - I''_{1дк}$ $\qquad I''_{3дк} = 0.278 + 0.158i$ $\qquad F(I''_{3дк}) = (0.32 \quad 29.509)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = 1.318 + 0.758i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (1.52 \quad 29.897)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = 0.9 + 0.521i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (1.04 \quad 30.076)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad I_{3дк} = 0.418 + 0.236i$ $\qquad F(I_{3дк}) = (0.48 \quad 29.509)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\qquad u_{Cдк} = 3.377 - 5.967i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (6.857 \quad -60.491)$

$u_{Lдк} := I_{3дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -3.546 + 6.266i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (7.2 \quad 119.509)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -8.439$

$i_{Lдк}(0) = 0.334$

Given

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

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

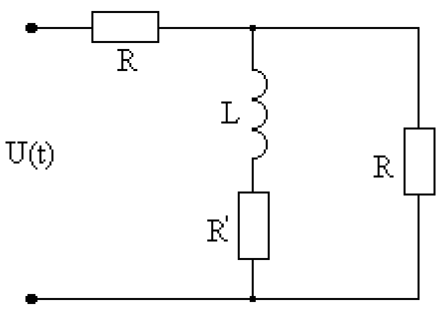
$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0} - u_{L0}$

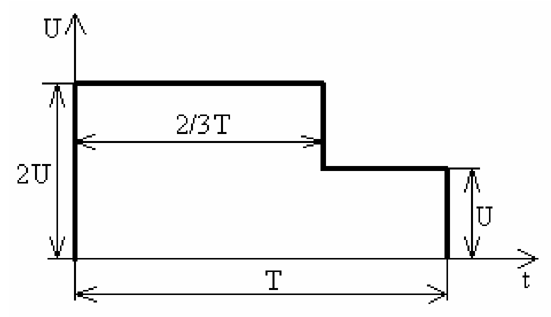
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 1.44$ $\qquad i_{20} = 1.106$ $\qquad i_{30} = 0.334$ $\qquad u_{L0} = -9.566$ $\qquad u_{C0} = -8.439$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.0$ $\quad E_1 := 100$ $\quad E := 1$ $\quad R' := R + R$ $\quad R' = 100$





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: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R'}{R + R'}\right) + R} \qquad i'_1 = 0.012$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R'} \qquad i'_3 = 4 \times 10^{-3} \qquad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R'}{R + R'} \qquad i'_2 = 8 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

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

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R' + R) + R \cdot (p \cdot L + R') \;\Big|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -833.33 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 1.2 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -833.33$$

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:

$A_1 := i_{10} - i'_1$ $\quad A_1 = -2 \times 10^{-3}$

$B_1 := i_{30} - i'_3$ $\quad B_1 = -4 \times 10^{-3}$

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:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ $\quad i_1(t)$ float, 5 $\rightarrow 1.2000 \cdot 10^{-2} - 2.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ $\quad i_3(t)$ float, 5 $\rightarrow 4.0000 \cdot 10^{-3} - 4.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t)$ $\quad g_{11}(t)$ float, 5 $\rightarrow 1.2000 \cdot 10^{-2} - 2.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$

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

$h_{uL}(t) := U_L(t)$ float, 5 $\rightarrow .50000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 2E_1$ $\quad U_0 = 200$

$U_1 := 2E_1$ $\quad U_1 = 200$ $\quad 0 < t < \frac{2T}{3}$

$U_2 := E_1$ $\quad U_2 = 100$ $\quad \frac{2T}{3} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t)$ factor, float, 3 $\rightarrow 2.40 - .400 \cdot \exp(-833. \cdot t)$

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

$i_2(t)$ factor, float, 5 $\rightarrow 1.2000 - .40000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t) + .20000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + .66667)$

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

$i_3(t)$ factor, float, 3 $\rightarrow -.400 \cdot \exp(-833. \cdot t) + .200 \cdot \exp(-833. \cdot t + .667) + .200 \cdot \exp(-833. \cdot t + 1.)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 100.00 \cdot \exp(-833.33 \cdot t)$$

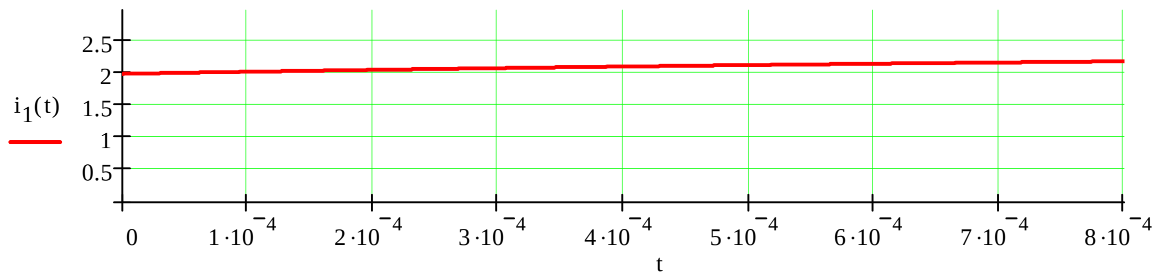
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 100.00 \cdot \exp(-833.33 \cdot t) - 50.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + .66667)$$

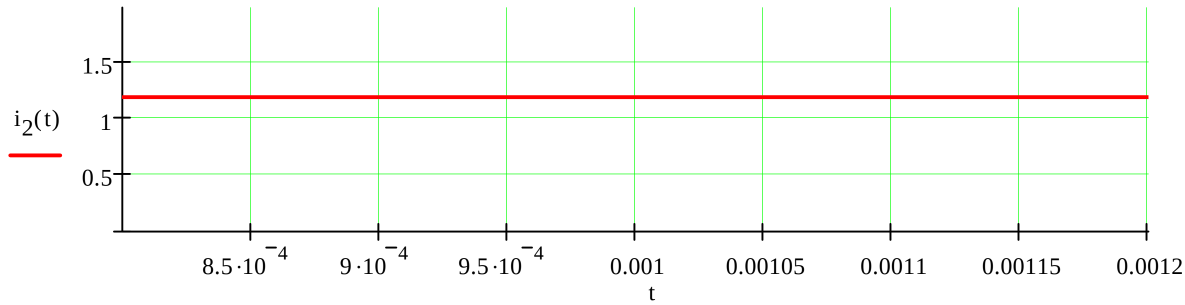
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right) + \left(U_3 - U_2\right) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 100.00 \cdot \exp(-833.33 \cdot t) - 50.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + .66667) - 50.000 \cdot \exp(-833.33 \cdot t + 1.0000)$$

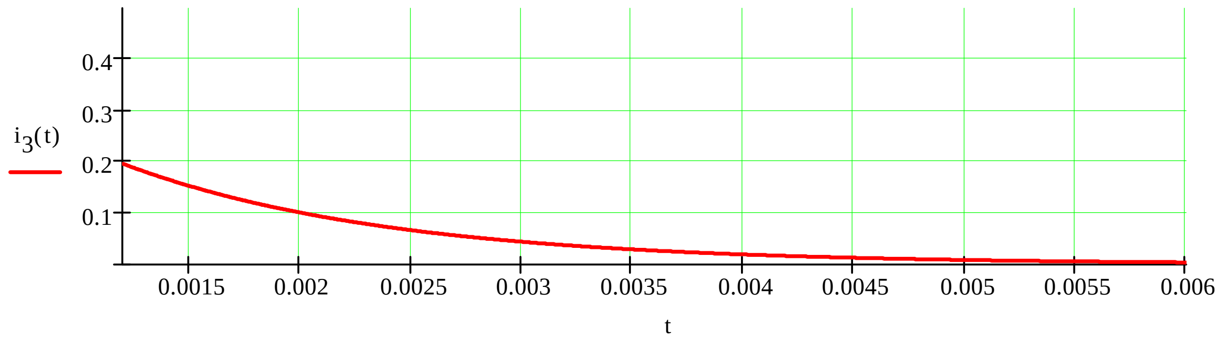
На промежутке от 0 до 2/3Т



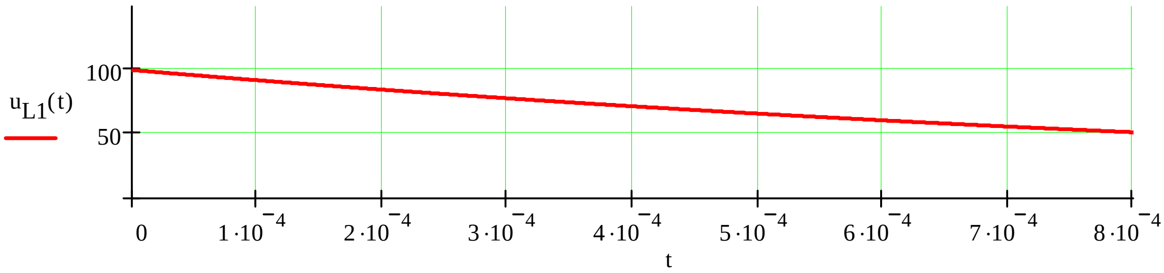
На промежутке от 2/3Т до Т



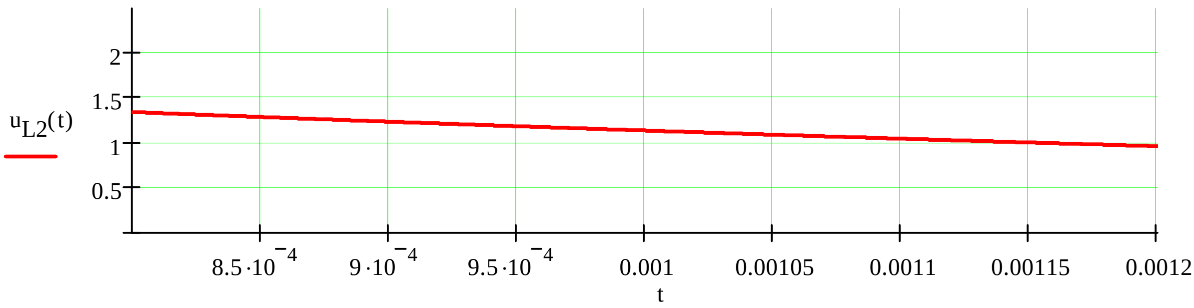
На промежутке от Т до 5Т



На промежутке от 0 до 2/3T



На промежутке от 2/3T до T



На промежутке от T до 10T