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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 303

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.

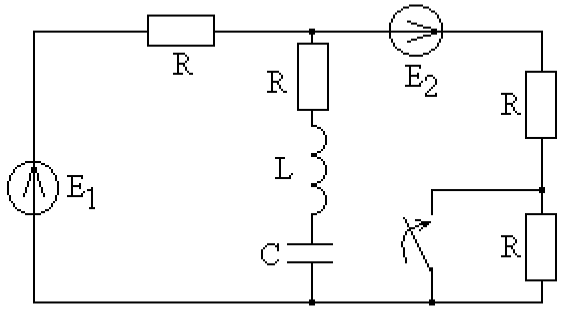
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

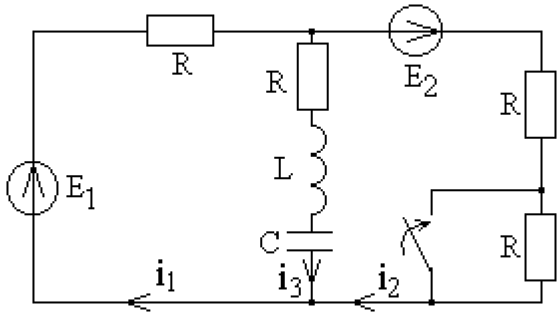
Вхідні данні:

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

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

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0 \qquad u_{Lдк} := 0$

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

Незалежні початкові умови

$i_{30} := i_{3дк} \qquad i_{30} = 0$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

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

Незалежні початкові умови

$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L} \qquad di_{30} = -300$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = -150$ $\quad$ $di_{20} = 150$ $\quad$ $du_{L0} = 2.25 \times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R \;\Big|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -676.04 \\ -73.960 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -676.04$ $\quad$ $p_2 = -73.96$

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

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

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

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

$A_1 = 0.249$ $\quad$ $A_2 = -0.249$

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

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

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.800000 + .2491363 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) - .2491363 \cdot \exp(-73.960 \cdot t)$ $\quad i_1(0) = 1.8$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2) \qquad B_1 = -0.249 \qquad B_2 = 0.249$$

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

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

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 7 \;\rightarrow 1.800000 - .2491363 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) + .2491363 \cdot \exp(-73.960 \cdot \quad i_2(0) = 1.8$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2) \qquad C_1 = 0.498 \qquad C_2 = -0.498$$

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

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

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 7 \;\rightarrow .4982727 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) - .4982727 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \qquad i_3(0) = 0$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2) \qquad D_1 = -3.685 \qquad D_2 = 33.685$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 7 \;\rightarrow 10. - 3.685225 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) + 33.68522 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \qquad u_C(0) = 40$$

Given

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

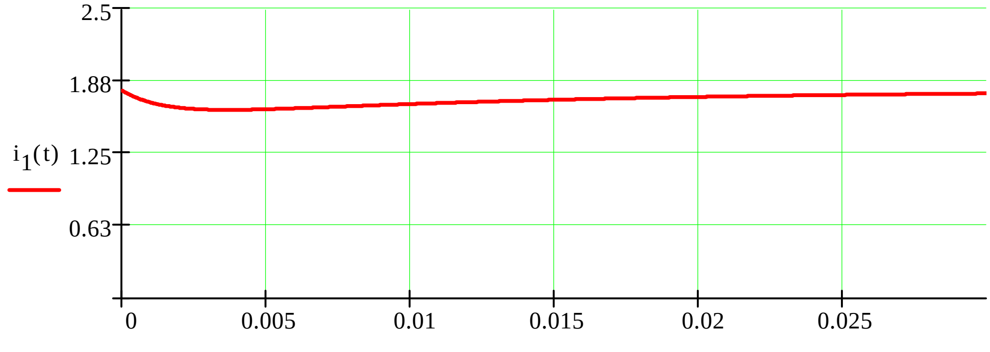
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2) \qquad F_1 = -33.685 \qquad F_2 = 3.685$$

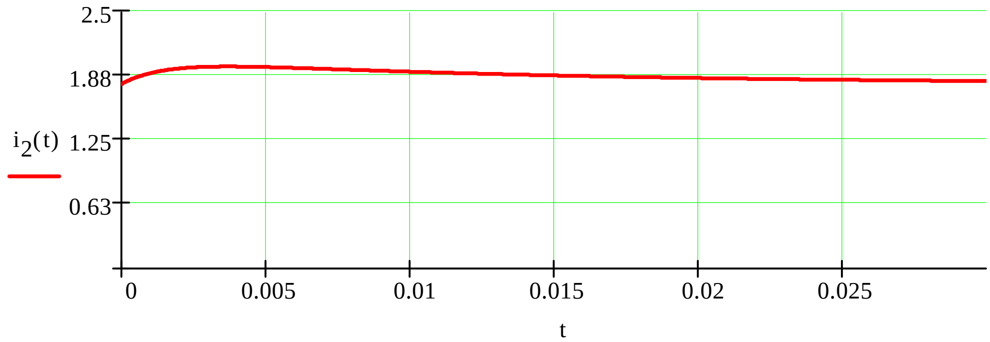
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

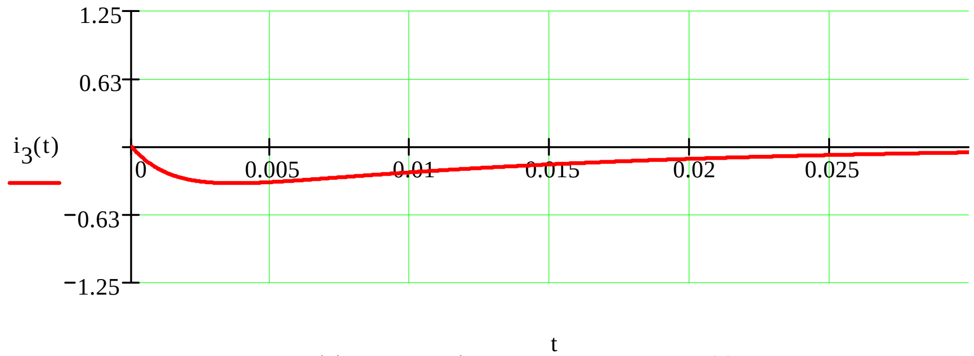
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 7 \;\rightarrow -33.68522 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) + 3.685225 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \qquad u_L(0) = -30$$



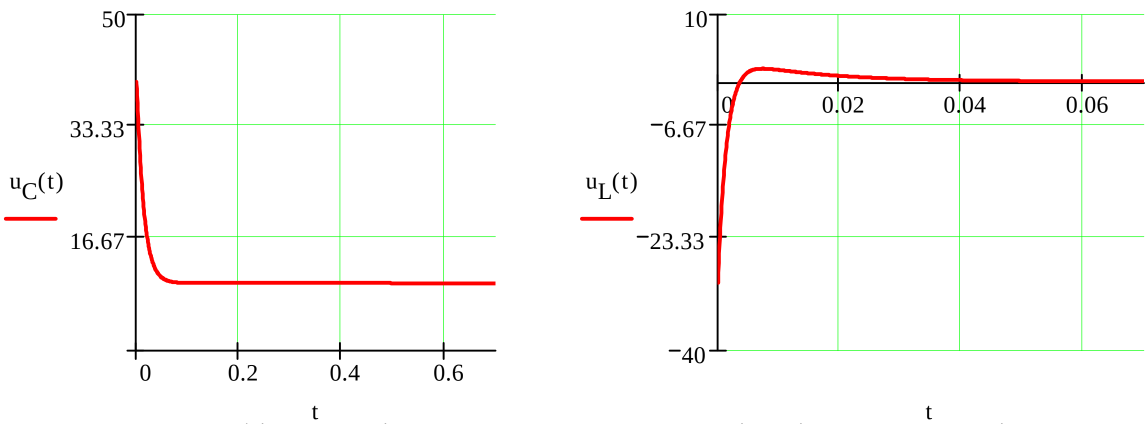
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

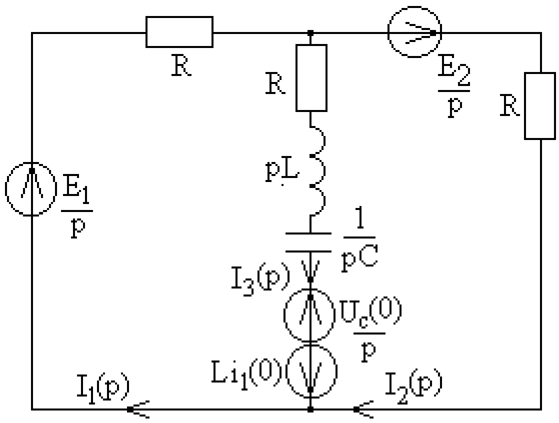


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

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

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{3дк}$ $\qquad i_{L0} = 0$

$u_{C0} = 40$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C} & -\left(R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}\right) \\ -\left(R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{1}{p\cdot C} + p\cdot L + 2\cdot R \end{bmatrix}\right| \quad \Delta(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}}\cdot\left(7500.0\cdot p + 10.0\cdot p^{2.} + 5.0000\cdot 10^{5}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{L0} & -\left(R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L\cdot i_{L0} & \frac{1}{p\cdot C} + p\cdot L + 2\cdot R \end{bmatrix}\right| \quad \Delta_1(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(12000.\cdot p + 18.0\cdot p^{2.} + 9.0000\cdot 10^{5}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{L0} \\ -\left(R + p\cdot L + \frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L\cdot i_{L0} \end{bmatrix}\right| \quad \Delta_2(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(15000.\cdot p + 18.0\cdot p^{2.} + 9.0000\cdot 10^{5}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(12000. \cdot p + 18.0 \cdot p^{2.} + 9.0000 \cdot 10^5\right)}{p^{1.} \cdot \left(7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^{2.} + 5.0000 \cdot 10^5\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(15000. \cdot p + 18.0 \cdot p^{2.} + 9.0000 \cdot 10^5\right)}{p^{1.} \cdot \left(7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^{2.} + 5.0000 \cdot 10^5\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-300.}{\left(750. \cdot p + p^2 + 50000.\right)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow 40 \cdot \frac{\left(750 \cdot p + p^2 + 12500\right)}{\left(750 \cdot p + p^2 + 50000\right) \cdot p}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow -30 \cdot \frac{p}{\left(750 \cdot p + p^2 + 50000\right)}$$

Перейдемо тепер від зображення до функції часу за формулою розкладу:

Для струму I1(p):

$$N_1(p) := 12000. \cdot p + 18.0 \cdot p^{2.} + 9.0000 \cdot 10^5 \qquad M_1(p) := p^{1.} \cdot \left(7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^{2.} + 5.0000 \cdot 10^5\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -676.04 \\ -73.960 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -676.04 \qquad p_2 = -73.96$$

$$N_1(p_0) = 9 \times 10^5 \qquad N_1(p_1) = 1.014 \times 10^6 \qquad N_1(p_2) = 1.109 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 15000. \cdot p + 30. \cdot p^{2.} + 5.0000 \cdot 10^5$$

$$dM_1(p_0) = 5 \times 10^5 \qquad dM_1(p_1) = 4.07 \times 10^6 \qquad dM_1(p_2) = -4.453 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 3 \rightarrow 1.80 + .249 \cdot \exp(-676. \cdot t) - .249 \cdot \exp(-74.0 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 40 \cdot \left(750 \cdot p + p^2 + 12500\right) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(750 \cdot p + p^2 + 50000\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -73.95 \\ -676.05 \end{pmatrix} \qquad p_0 = 0 \qquad p_1 = -73.95 \qquad p_2 = -676.05$$

$N_u(p_0) = 5\times 10^5$ $\quad N_u(p_1) = -1.5\times 10^6$ $\quad N_u(p_2) = -1.5\times 10^6$

$dM_u(p) := \frac{d}{dp}M_u(p)$ factor $\rightarrow 1500\cdot p + 3\cdot p^2 + 50000$

$dM_u(p_0) = 5\times 10^4$ $\quad dM_u(p_1) = -4.452\times 10^4$ $\quad dM_u(p_2) = 4.071\times 10^5$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = 40.003$$

$u_C(t)$ float, 5 $\rightarrow 10. + 33.688\cdot\exp(-73.95\cdot t) - 3.6844\cdot\exp(-676.05\cdot t)$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := -30\cdot p$ $\qquad M_L(p) := 750\cdot p + p^2 + 50000$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left|\begin{matrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -73.95 \\ -676.05 \end{pmatrix} \qquad p_1 = -73.95 \qquad p_2 = -676.05$$

$N_L(p_1) = 2.219\times 10^3$ $\qquad N_L(p_2) = 2.028\times 10^4$

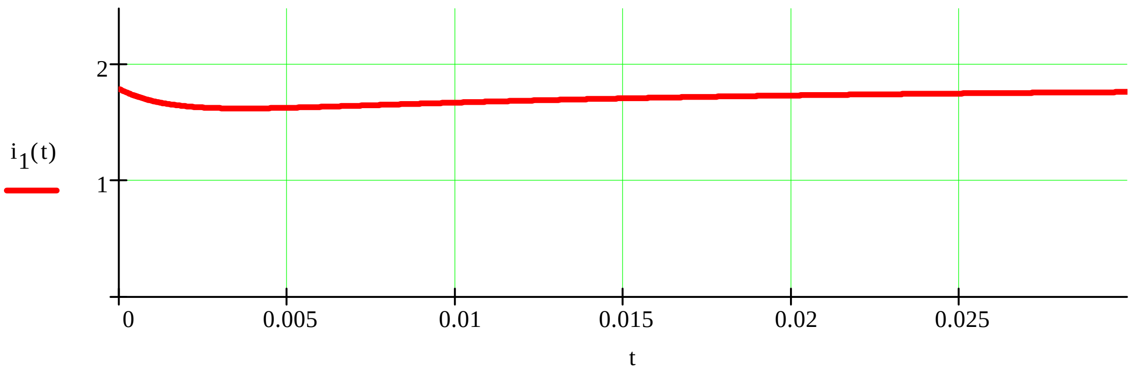
$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p)$ factor $\rightarrow 750 + 2\cdot p$

$dM_L(p_1) = 602.1$ $\qquad dM_L(p_2) = -602.1$

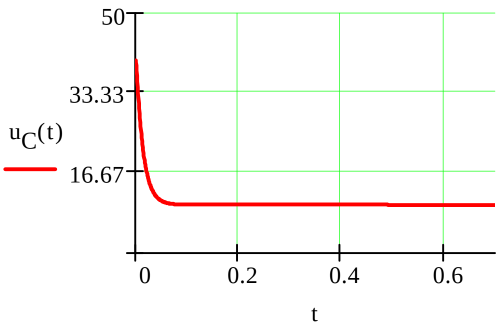
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

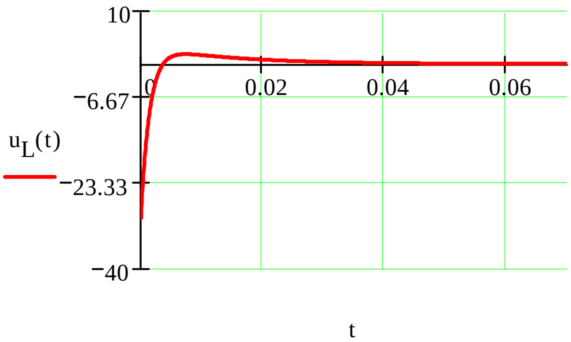
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_L(0) = -30$$

$u_L(t)$ float, 5 $\rightarrow 3.6846\cdot\exp(-73.95\cdot t) - 33.685\cdot\exp(-676.05\cdot t)$



Графік перехідного струму i1(t).

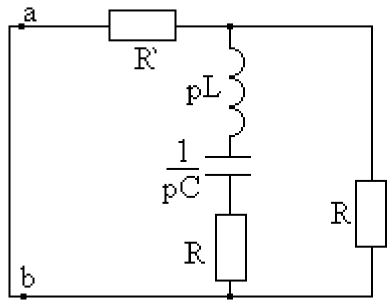




Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + R^2\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L + R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \left| \begin{matrix} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -32.725 \\ -4.7746 \end{pmatrix}$$

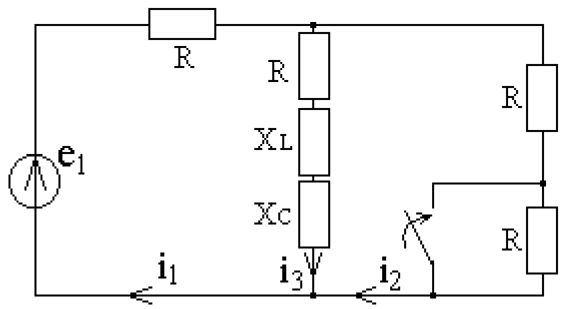
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 50 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 10$$

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

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

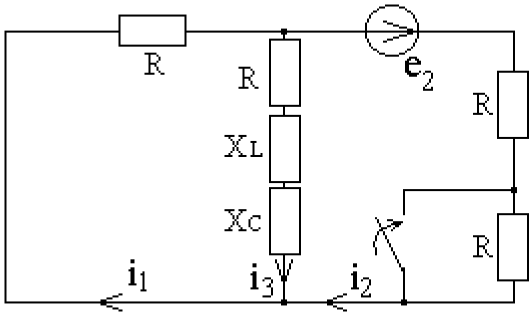


$$Z'_{vx} := R + \frac{2 \cdot R \cdot \left(R + X_L \cdot i - i \cdot X_C\right)}{2 \cdot R + R + X_L \cdot i - i \cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 87.759 - 16.598i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.849 + 0.73i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.12 \quad 40.71)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{\left(R + X_L \cdot i - i \cdot X_C\right)}{2 \cdot R + R + X_L \cdot i - i \cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.442 + 0.135i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.462 \quad 16.981)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = 0.407 + 0.595i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.721 \quad 55.641)$$



$$Z''_{vx} := R + R + \frac{\left(R + i\cdot X_L - X_C\cdot i\right)\cdot R}{R + i\cdot X_L - X_C\cdot i + R} \qquad Z''_{vx} = 128.448 - 8.621i$$

$$I''_{2дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{2дк} = 0.516 + 0.346i \qquad F\left(I''_{2дк}\right) = (0.621 \quad 33.84)$$

$$I''_{1дк} := I''_{2дк}\cdot\frac{\left(R + X_L\cdot i - X_C\cdot i\right)}{R + i\cdot X_L - X_C\cdot i + R} \qquad I''_{1дк} = 0.353 + 0.108i \qquad F\left(I''_{1дк}\right) = (0.369 \quad 16.981)$$

$$I''_{3дк} := I''_{2дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{3дк} = 0.163 + 0.238i \qquad F\left(I''_{3дк}\right) = (0.288 \quad 55.641)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 1.202 + 0.838i \qquad F\left(I_{1дк}\right) = (1.465 \quad 34.887)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.958 + 0.481i \qquad F\left(I_{2дк}\right) = (1.072 \quad 26.661)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = 0.244 + 0.357i \qquad F\left(I_{3дк}\right) = (0.433 \quad 55.641)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк}\cdot\left(-i\cdot X_C\right) \qquad u_{Cдк} = 17.861 - 12.211i \qquad F\left(u_{Cдк}\right) = (21.637 \quad -34.359)$$

$$u_{Lдк} := I_{3дк}\cdot i\cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -3.572 + 2.442i \qquad F\left(u_{Lдк}\right) = (4.327 \quad 145.641)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cдк}(0) = -17.269$$

$$i_{Lдк}(0) = 0.505$$

Given

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

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

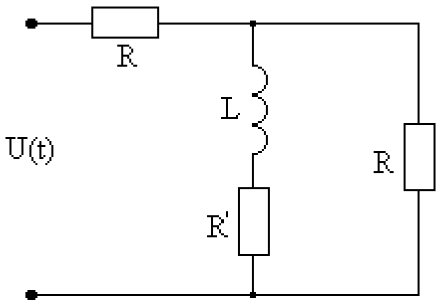
$$e_2(0) = i_{20}\cdot R - i_{30}\cdot R - u_{C0} - u_{L0}$$

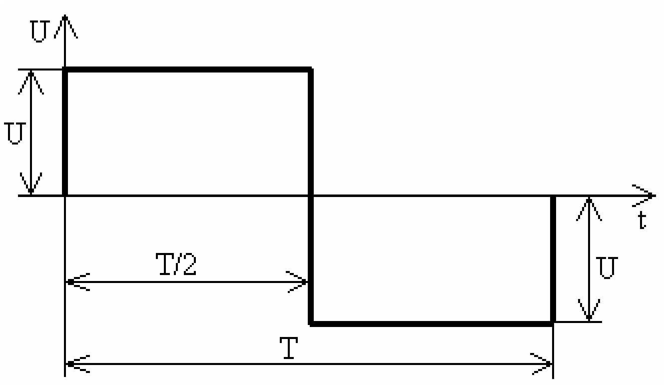
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{20}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 1.525$ $\quad i_{20} = 1.02$ $\quad i_{30} = 0.505$ $\quad u_{L0} = -13.549$ $\quad u_{C0} = -17.269$

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

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R' + R) + R \cdot (p \cdot L + R') \ \left|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix}\right. \rightarrow -1250. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 8 \times 10^{-4}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -1.25 \times 10^{3}$$

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:

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

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

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:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad i_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 1.2000 \cdot 10^{-2} - 2.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1250. \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \qquad i_3(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 4.0000 \cdot 10^{-3} - 4.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1250. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 1.2000 \cdot 10^{-2} - 2.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1250. \cdot t)$

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

$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow .50000 \cdot \exp(-1250. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 100$

$U_1 := E_1 \qquad U_1 = 100 \qquad 0 < t < \frac{T}{2}$

$U_2 := -E_1 \qquad U_2 = -100 \qquad \frac{T}{2} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t) \ \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow 1.20 - .200 \cdot \exp\left(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t\right)$

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

$i_2(t) \ \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow -1.2000 - .20000 \cdot \exp(-1250. \cdot t) + .40000 \cdot \exp(-1250. \cdot t + .50000)$

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

$i_3(t) \ \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow -.200 \cdot \exp\left(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t\right) + .400 \cdot \exp\left(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t + .500\right) - .200 \cdot \exp\left(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t + 1.\right)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 50.000 \cdot \exp(-1250. \cdot t)$

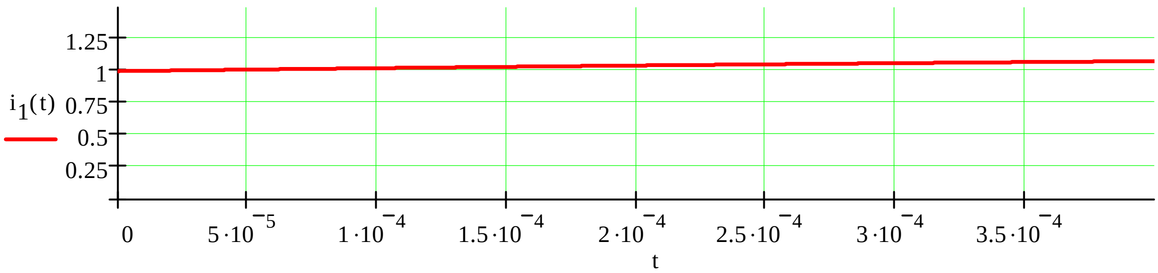
$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$

$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 50.000 \cdot \exp(-1250. \cdot t) - 100.00 \cdot \exp(-1250. \cdot t + .50000)$

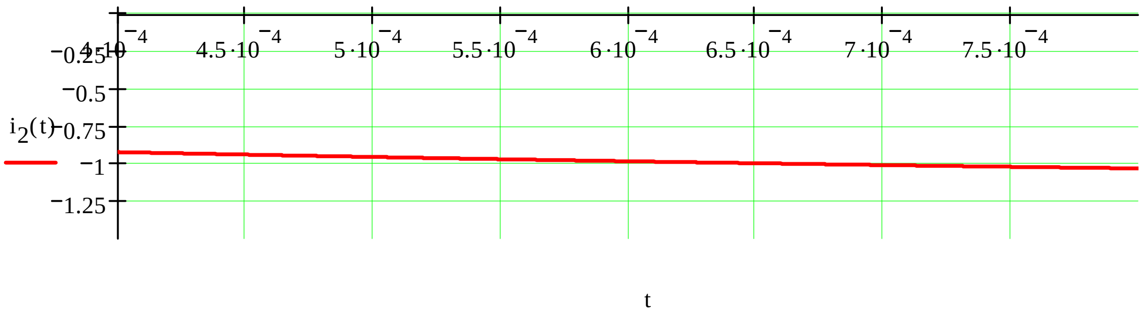
$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$

$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 50.000 \cdot \exp(-1250. \cdot t) - 100.00 \cdot \exp(-1250. \cdot t + .50000) + 50.000 \cdot \exp(-1250. \cdot t + 1.0000)$

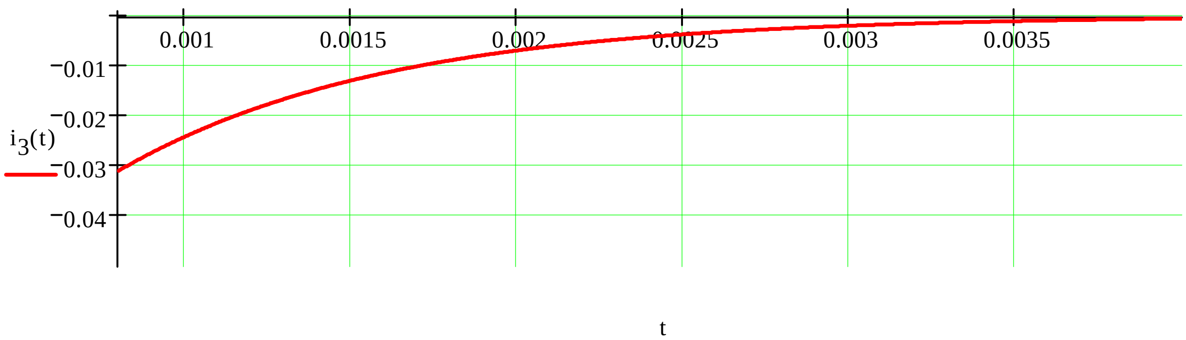
На промежутке от 0 до 1/2T



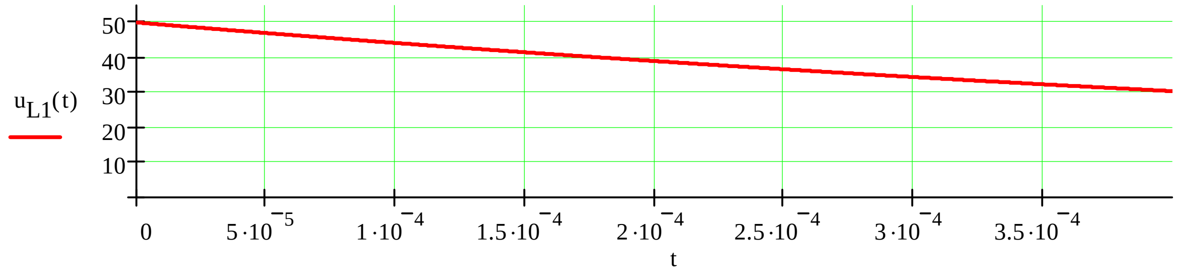
На промежутке от 1/2T до T



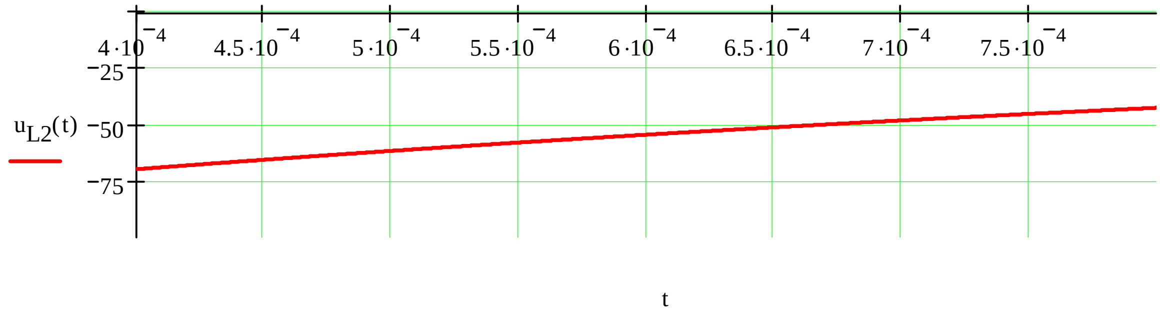
На промежутке от T до 5T



На промежутке от 0 до 1/2T



На промежутке от 1/2T до T



На промежутке от T до 10T