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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 412

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.

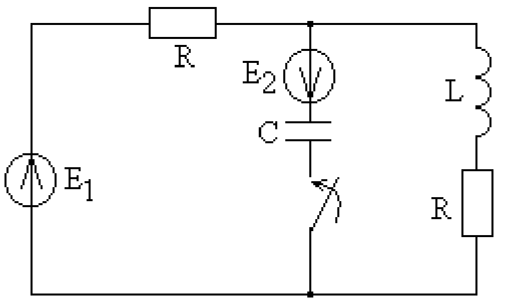
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

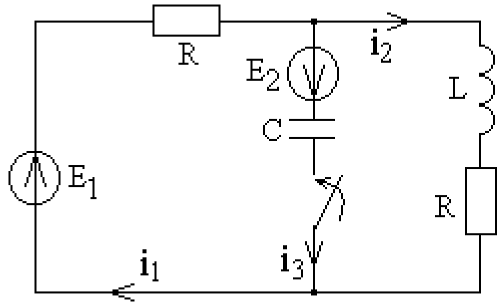
Вхідні данні:

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

$E_1 := 90$ В $E_2 := 60$ В $\psi := 45 \cdot deg$ C^0 $\omega := 200$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0.9$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\quad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 0.9$

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

$u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 105$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad i_{20} = 0.9$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \rightarrow \begin{pmatrix} 3 \\ \frac{21}{10} \\ -105 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 3 \quad i_{30} = 2.1 \quad u_{L0} = -105$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{20} = -700$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0})$ $\qquad di_{10} = -60 \qquad di_{30} = 640 \qquad du_{L0} = 3.8 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 6 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -297.983 \\ -63.9219 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -297.983 \qquad p_2 = -63.922$

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

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

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

$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A_1, A_2)$ $\qquad A_1 = -0.317 \qquad A_2 = 2.417$

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

$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -.31717 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.4172 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ float, 5 $\rightarrow .90000 - .31717 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.4172 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_1(0) = 3$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B_1, B_2)$ $\qquad B_1 = 2.991 \qquad B_2 = -2.991$

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

$i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + B_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow 2.9907 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 2.9907 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)$ float, 5 $\rightarrow .90000 + 2.9907 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 2.9907 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_2(0) = 0.9$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C_1, C_2)$ $\qquad C_1 = -3.308 \qquad C_2 = 5.408$

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

$i''_3(t) := C_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -3.3078 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 5.4078 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ float, 5 $\rightarrow -3.3078 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 5.4078 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad i_3(0) = 2.1$

Given

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

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

$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D_1, D_2)$ $\qquad D_1 = 15.858 \qquad D_2 = -120.858$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + D_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 6 $\rightarrow 15.8583 \cdot \exp(-297.983 \cdot t) - 120.858 \cdot \exp(-63.9219 \cdot t)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)$ float, 5 $\rightarrow 105. + 15.858 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 120.86 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

Given

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

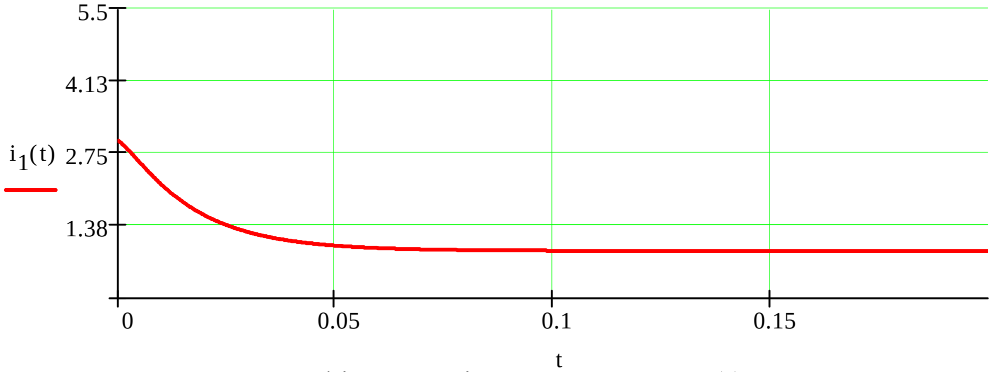
$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$

$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F_1, F_2)$ $\qquad F_1 = -133.675 \qquad F_2 = 28.675$

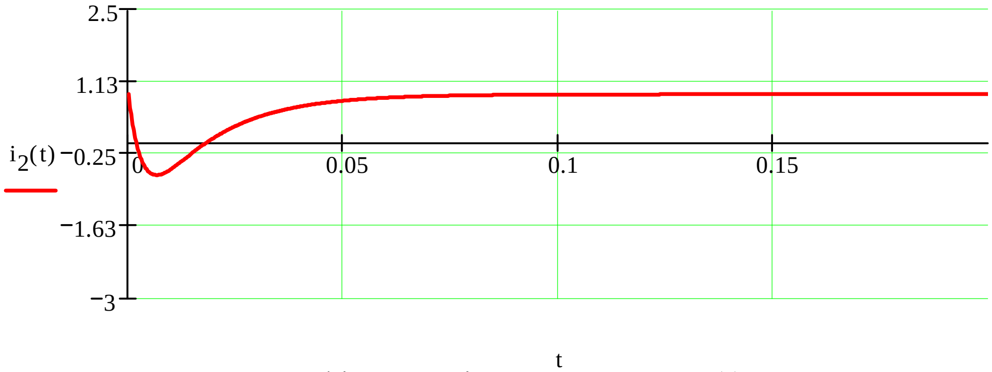
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + F_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}$ float, 5 $\rightarrow -133.68 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 28.675 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$

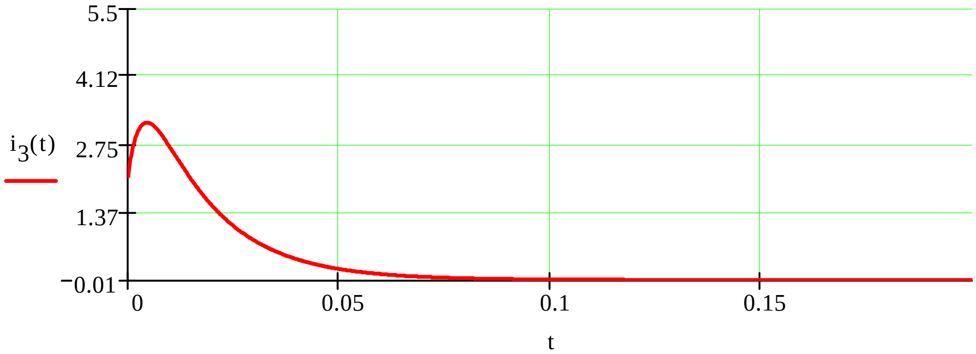
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)$ float, 5 $\rightarrow -133.68 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 28.675 \cdot \exp(-63.922 \cdot t)$ $\qquad u_L(0) = -105.005$



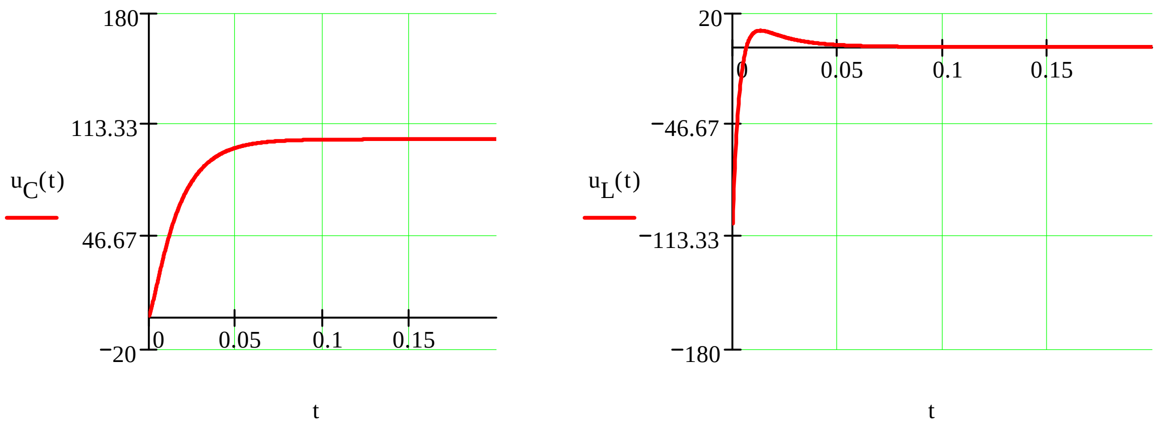
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

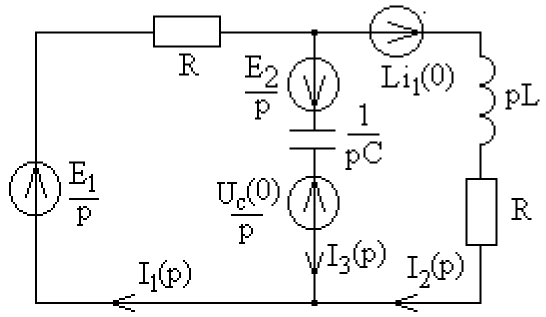


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 0.9$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 105$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк}$ $\quad i_{L0} = 0.9$

$u_{C0} = 0$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right|$$

$$\Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(1.4286 \cdot 10^5 + 2714.3 \cdot p + 7.5000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right|$$

$$\Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(1.2857 \cdot 10^5 + 7692.9 \cdot p + 22.50 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right|$$

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(1.2857 \cdot 10^5 - 2807.1 \cdot p + 6.7500 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(1.2857\cdot 10^5 + 7692.9\cdot p + 22.50\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(1.4286\cdot 10^5 + 2714.3\cdot p + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float}, 5\ \rightarrow \frac{\left(1.2857\cdot 10^5 - 2807.1\cdot p + 6.7500\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(1.4286\cdot 10^5 + 2714.3\cdot p + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{array}\right. \rightarrow 52.500000000000000000\cdot\frac{(2000. + 3.\cdot p)}{\left(1428600. + 27143.\cdot p + 75.\cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2дк}\ \text{factor}\ \rightarrow \frac{-3}{200}\cdot\frac{(400 + 524997\cdot p)}{\left(1428600 + 27143\cdot p + 75\cdot p^2\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p\cdot C}\ \text{factor}\ \rightarrow 75000\cdot\frac{(2000 + 3\cdot p)}{\left(1428600 + 27143\cdot p + 75\cdot p^2\right)\cdot p}$$

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

$$N_1(p) := 1.2857\cdot 10^5 + 7692.9\cdot p + 22.50\cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(1.4286\cdot 10^5 + 2714.3\cdot p + 7.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -297.98\\ -63.923\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\qquad p_1 = -297.98$ $\qquad p_2 = -63.923$

$N_1(p_0) = 1.286\times 10^5$ $\qquad N_1(p_1) = -1.659\times 10^5$ $\qquad N_1(p_2) = -2.712\times 10^5$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{factor}\\ \text{float}, 5\end{array}\right. \rightarrow 1.4286\cdot 10^5 + 5428.6\cdot p + 22.500\cdot p^{2.}$$

$dM_1(p_0) = 1.429\times 10^5$ $\qquad dM_1(p_1) = 5.231\times 10^5$ $\qquad dM_1(p_2) = -1.122\times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad i_1(0) = 3$$

$$i_1(t)\ \left|\begin{array}{l}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow .89997 - .31724\cdot\exp(-297.98\cdot t) + 2.4172\cdot\exp(-63.923\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 75000\cdot(2000 + 3\cdot p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(1428600 + 27143\cdot p + 75\cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_u(p)\ \left|\begin{array}{l}\text{solve}, p\\ \text{float}, 15\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -63.922957599319\\ -297.983709067347\end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\qquad p_1 = -63.923$ $\qquad p_2 = -297.984$

$N_u(p_0) = 1.5\times10^{8}$ $\quad N_u(p_1) = 1.356\times10^{8}$ $\quad N_u(p_2) = 8.295\times10^{7}$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp}M_u(p)\ \text{factor} \ \rightarrow 1428600 + 54286\cdot p + 225\cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 1.429\times10^{6}$ $\quad dM_u(p_1) = -1.122\times10^{6}$ $\quad dM_u(p_2) = 5.231\times10^{6}$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = -1.506\times10^{-12}$$

$$u_C(t)\ \begin{vmatrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{vmatrix} \rightarrow 105.00 - 120.86\cdot\exp(-63.923\cdot t) + 15.858\cdot\exp(-297.98\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{-3}{200}(400 + 524997\cdot p) \qquad M_L(p) := \left(1428600 + 27143\cdot p + 75\cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix}p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_L(p)\ \begin{vmatrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 15\end{vmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-63.922957599319\\ -297.983709067347\end{pmatrix}$$

$p_1 = -63.923$ $\quad p_2 = -297.984$

$N_L(p_1) = 5.034\times10^{5}$ $\quad N_L(p_2) = 2.347\times10^{6}$

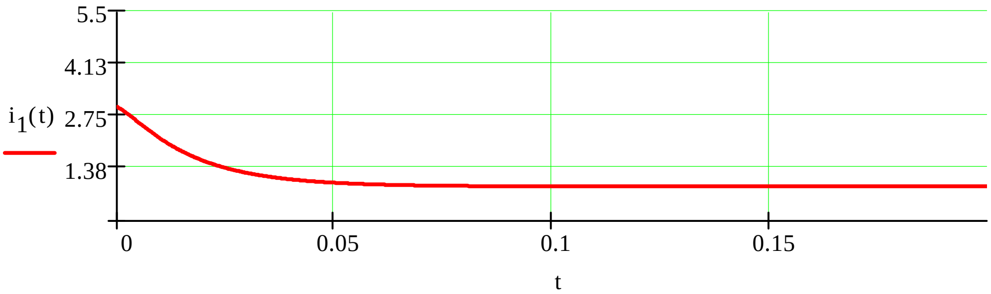
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p)\ \text{factor} \ \rightarrow 27143 + 150\cdot p$$

$dM_L(p_1) = 1.755\times10^{4}$ $\quad dM_L(p_2) = -1.755\times10^{4}$

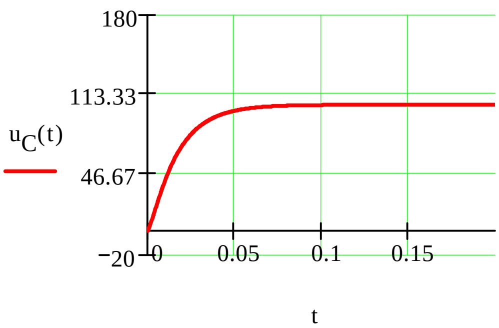
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

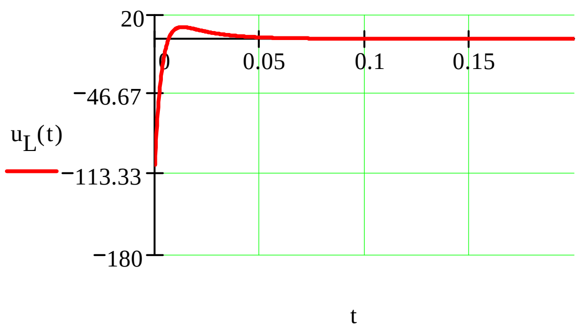
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_L(0) = -104.999$$

$$u_L(t)\ \begin{vmatrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{vmatrix} \rightarrow 28.675\cdot\exp(-63.923\cdot t) - 133.67\cdot\exp(-297.98\cdot t)$$



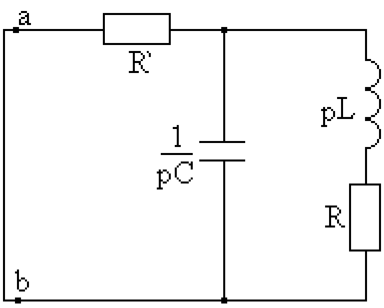
Графік перехідного струму i1(t).





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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2.7030 \\ 10.340 \end{pmatrix}$$

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

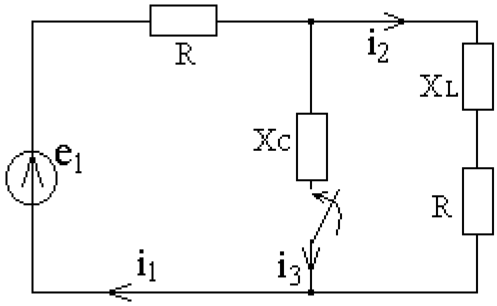
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 7.143 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 30$$

$$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_1 = 63.64 + 63.64i \qquad F(E_1) = (90 \quad 45)$$

$$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_2 = 42.426 + 42.426i \qquad F(E_2) = (60 \quad 45)$$

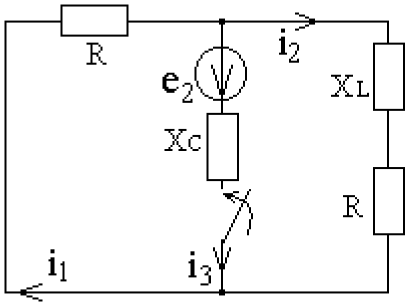


$$Z'_{vx} := 2 \cdot R + X_L \cdot i \qquad Z'_{vx} = 100 + 30i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.759 + 0.409i \qquad F(I'_{1дк}) = (0.862 \quad 28.301)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \qquad I'_{2дк} = 0.759 + 0.409i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.862 \quad 28.301)$$

$$I'_{3дк} := 0$$



$I''_{2дк} := 0$ $\qquad I''_{2дк} = 0$

$I''_{1дк} := 0$ $\qquad I''_{1дк} = 0$

$I''_{3дк} := 0$ $\qquad I''_{3дк} = 0$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = 0.759 + 0.409i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (0.862 \ \ 28.301)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = 0.759 + 0.409i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (0.862 \ \ 28.301)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad I_{3дк} = 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - I_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 68.116 + 85.631i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (109.419 \ \ 51.499)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -12.261 + 22.77i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (25.861 \ \ 118.301)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 121.101$

$i_{Lдк}(0) = 0.578$

Given

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

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

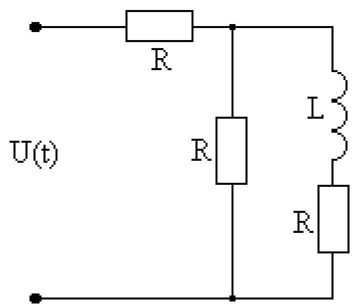
$-e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0} + u_{L0}$

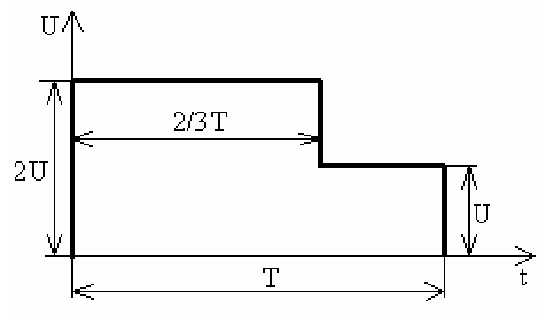
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{30}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 4.222$ $\qquad i_{20} = 0.578$ $\qquad i_{30} = 3.644$ $\qquad u_{L0} = 32.202$ $\qquad u_{C0} = 121.101$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.9$ $E_1 := 90$ $E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{0}{1.5 \cdot R}$ $i_{1дк} = 0$ $u_{Lдк} := 0$

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{1.5 \cdot R}$ $i'_1 = 0.013$

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

$u'_L := 0$

Незалежні початкові умови $i_{30} := i_{3дк}$ $i_{30} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow -500.$ $T := \frac{1}{|p|}$ $T = 2 \times 10^{-3}$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$p = -500$

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:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ $\qquad i_1(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-500. \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ $\qquad i_3(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} - 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-500. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t)$ $\qquad g_{11}(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-500. \cdot t)$

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

$h_{uL}(t) := U_L(t)\ \text{float},5\ \rightarrow .50000 \cdot \exp(-500. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 2E_1$ $\qquad U_0 = 180$

$U_1 := 2E_1$ $\qquad U_1 = 180$ $\qquad 0 < t < \frac{2T}{3}$

$U_2 := E_1$ $\qquad U_2 = 90$ $\qquad \frac{2T}{3} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},3 \end{array} \right. \rightarrow 2.40 - .600 \cdot \exp(-500. \cdot t)$

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

$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow 1.2000 - .60000 \cdot \exp(-500. \cdot t) + .30000 \cdot \exp(-500. \cdot t + .66667)$

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

$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},3 \end{array} \right. \rightarrow -1.00 \cdot 10^{-19} - .600 \cdot \exp(-500. \cdot t) + .300 \cdot \exp(-500. \cdot t + .667) + .300 \cdot \exp(-500. \cdot t + 1.)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 90.000 \cdot \exp(-500. \cdot t)$

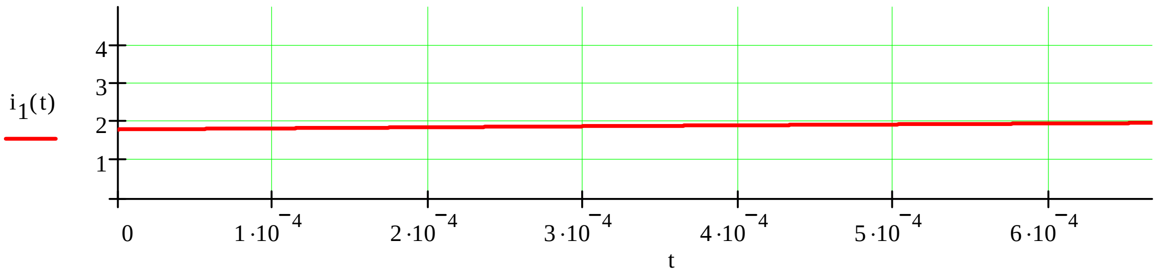
$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right)$

$u_{L2}(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 90.000 \cdot \exp(-500. \cdot t) - 45.000 \cdot \exp(-500. \cdot t + .66667)$

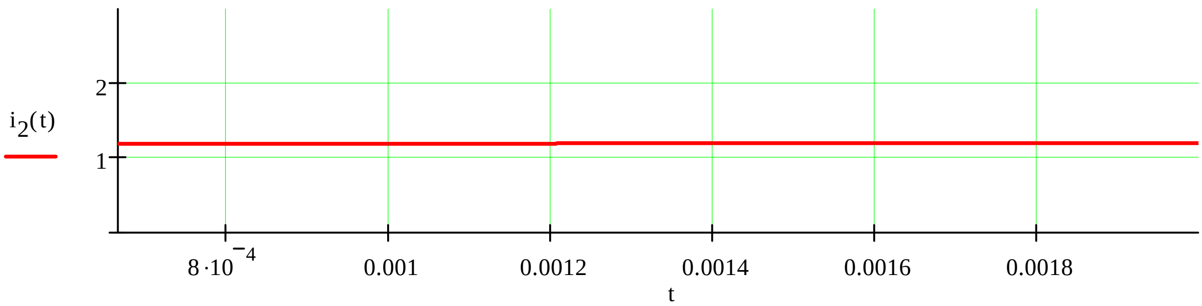
$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$

$u_{L3}(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 90.000 \cdot \exp(-500. \cdot t) - 45.000 \cdot \exp(-500. \cdot t + .66667) - 45.000 \cdot \exp(-500. \cdot t + 1.0000)$

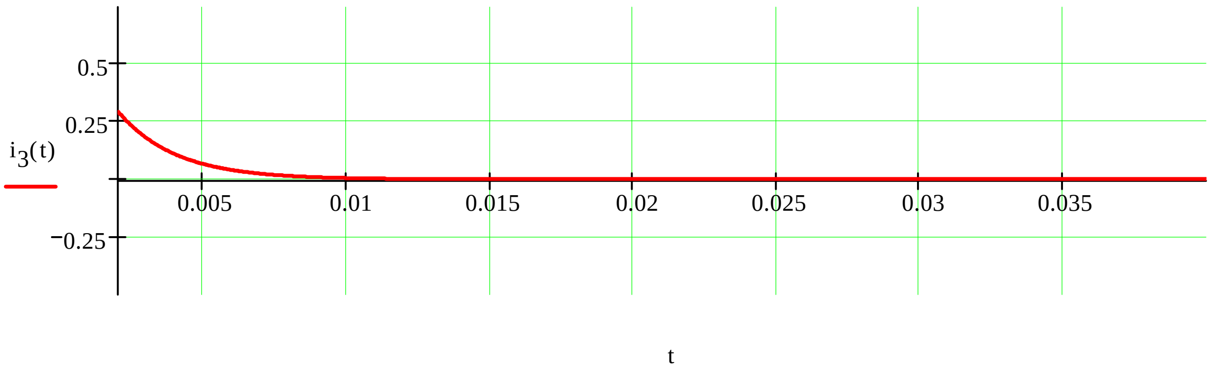
На промежутке от 0 до 2/3T



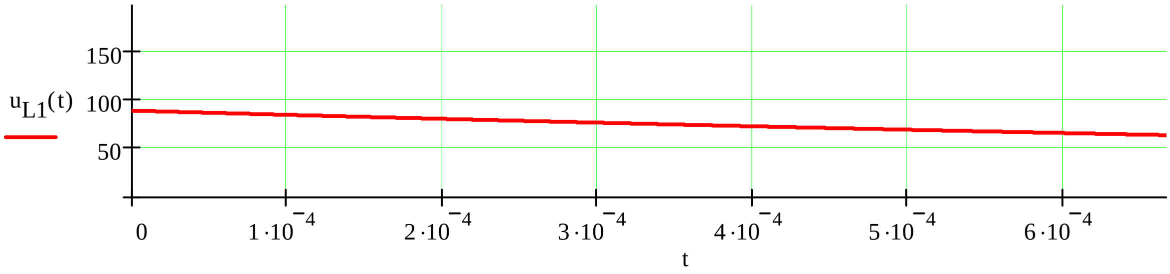
На промежутке от 2/3T до T



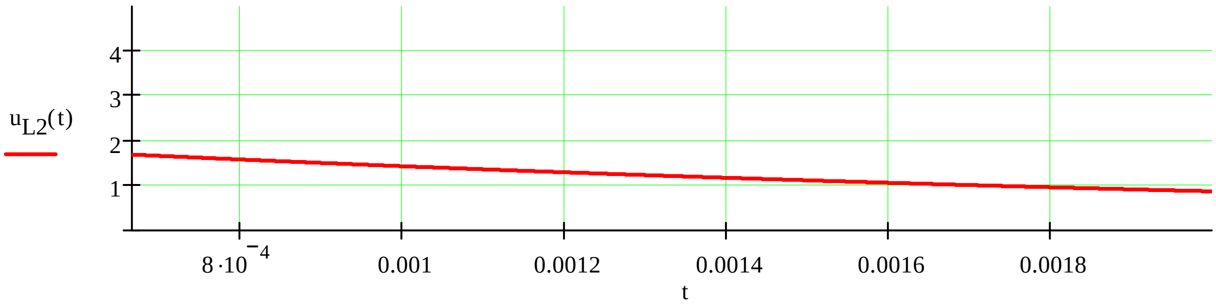
На промежутке от T до 20T



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



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



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от T до 20T