

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 409

Виконав: _____

Перевірив: _____

Умова завдання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

- 1) класичним методом розрахувати напруги на реактивних елементах та струми перехідного процесу;
- 2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС E_1 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 E_1 , 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 E_1 і E_2 в колі діють синусоїдні джерела.

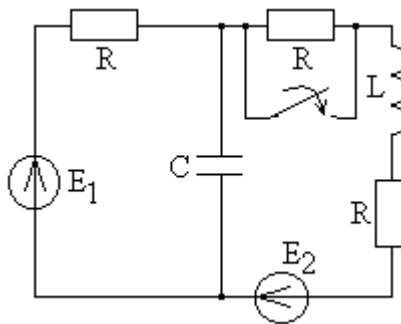
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

а) виключити катушку індуктивності чи ємність, замінивши останню опором R ;

б) вважаючи, що замість джерела постійної ЕДС E_1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивному елементі методом інтеграла Дюамеля при періоді T , заданому в долях від τ ;

г) побудувати в одному часовому масштабі діаграми напруги на вході, вхідного струму і напруги на реактивних елементах.



Вхідні данні:

$$L := 0.15 \quad \text{Гн} \quad C := 700 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ф}$$

$$R := 50 \quad \text{Ом}$$

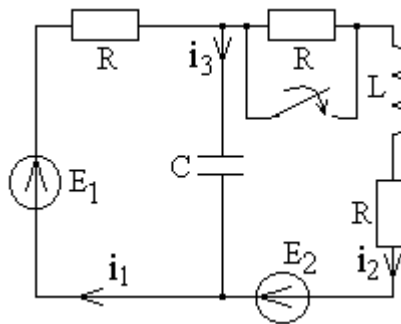
$$E_1 := 100 \quad \text{В} \quad E_2 := 80 \quad \text{В}$$

$$\psi := 30 \cdot \text{deg} \quad \text{C}^0$$

$$\omega := 100 \quad \text{с}^{-1}$$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$$i_{3\text{ДК}} := 0 \quad u_{L\text{ДК}} := 0$$

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = 40$$

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

$$i_{20} := i_{2\text{ДК}} \quad i_{20} = 1.2$$

$$u_{C0} := u_{C\text{ДК}} \quad u_{C0} = 40$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.2000 \\ 0 \\ 60. \end{pmatrix}$$

$$i_{30} = 0 \quad i_{10} = 1.2 \quad u_{L0} = 60$$

Незалежні початкові умови

$$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{20} = 400$$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$$di_{10} = 0$$

$$di_{30} = -400$$

$$du_{L0} = -2 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \left| \begin{matrix} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -297.98 \\ -63.922 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -297.98$$

$$p_2 = -63.922$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

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

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

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

Визначення сталих інтегрування:

Given

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

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

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

$$A_1 = 0.164$$

$$A_2 = -0.764$$

Отже вільна складова струму $i_1(t)$ буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float, 7} \rightarrow 1.800000 + .1638619 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .7638619 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) = 1.2$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2)$$

$$B_1 = -1.545$$

$$B_2 = 0.945$$

Отже вільна складова струму $i_2(t)$ буде мати вигляд:

$$i_2''(t) := B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i_2(t) := i_2' + i_2''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.800000 - 1.545116 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + .9451162 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_2(0) = 1.2$$

Given

$$i_{30} - i_3' = C_1 + C_2$$

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

$$di_{30} = -400$$

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 1.709 \quad C_2 = -1.709$$

Отже вільна складова струму $i_3(t)$ буде мати вигляд:

$$i_3''(t) := C_1 \cdot e^{p_1 t} + C_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i_3(t) := i_3' + i_3''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.708978 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 1.708978 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_3(0) = 0$$

Given

$$u_{C0} - u_C' = D_1 + D_2$$

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -8.193 \quad D_2 = 38.193$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u_C' + u_C''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 10. - 8.193097 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 38.19310 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad u_C(0) = 40$$

Given

$$u_{L0} - u_L' = F_1 + F_2$$

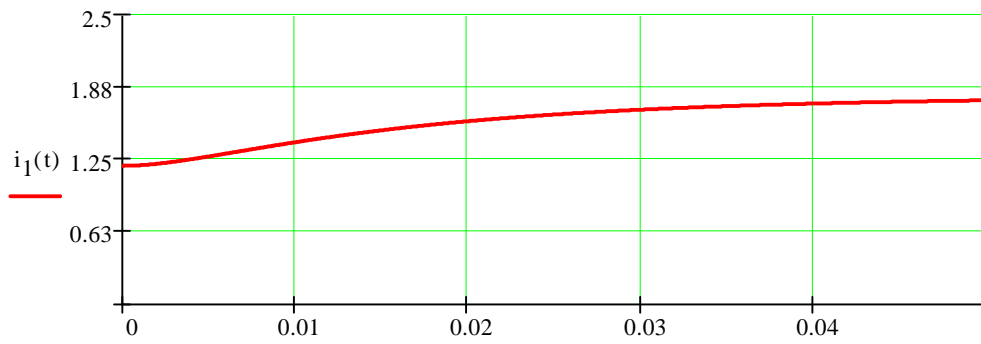
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = 69.063 \quad F_2 = -9.063$$

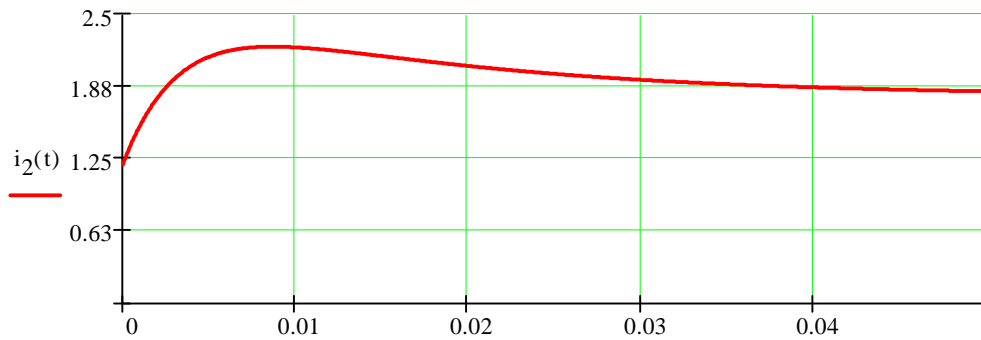
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

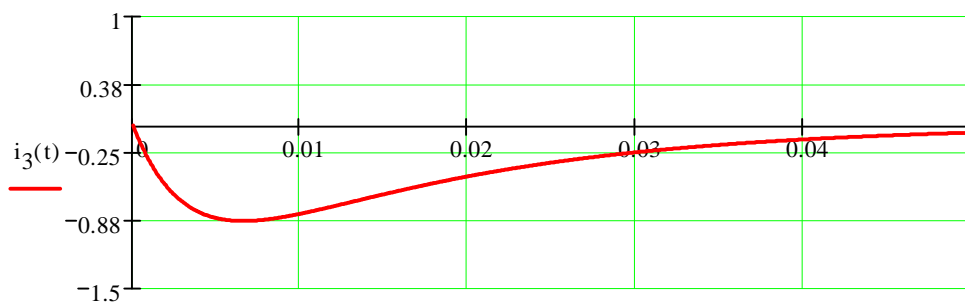
$$u_L(t) := u_L' + u_L''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 69.06271 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 9.062711 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad u_L(0) = 60$$



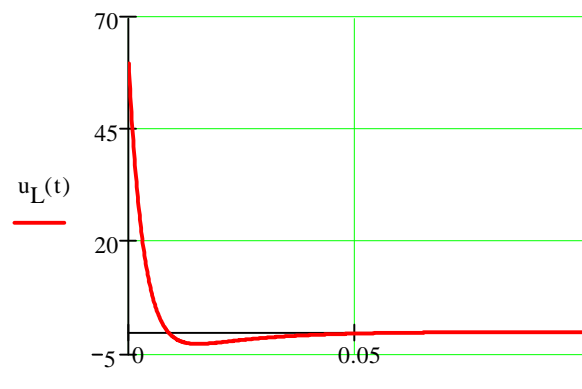
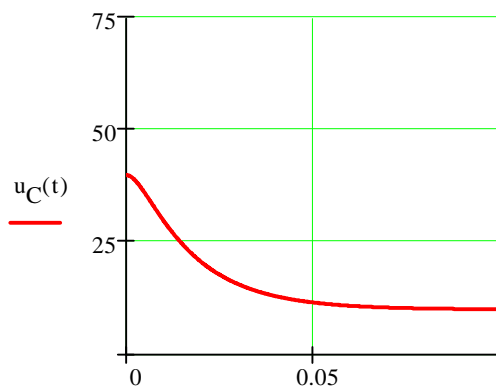
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

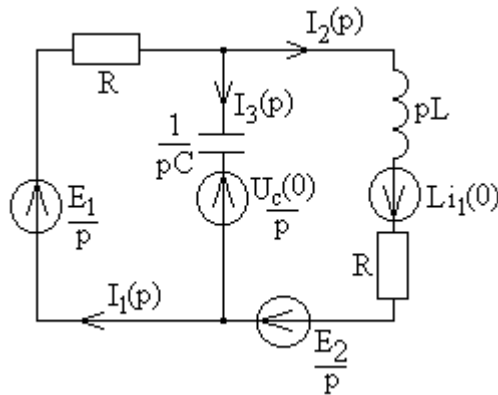


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$$i_{3\text{дк}} := 0 \quad u_{L\text{дк}} := 0$$

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

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{2\text{дк}} \quad i_{L0} = 1.2$$

$$u_{C0} = 40$$

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

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

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{vmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^2)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{vmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(3257.1 \cdot p + 2.5714 \cdot 10^5 + 9.00 \cdot p^2)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{vmatrix} \quad \Delta_2(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(6257.1 \cdot p + 9.0000 \cdot p^2 + 2.5714 \cdot 10^5)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_{k1}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(3257.1 \cdot p + 2.5714 \cdot 10^5 + 9.00 \cdot p^2)}{p^1 \cdot (2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^2)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_{k2}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(6257.1 \cdot p + 9.0000 \cdot p^2 + 2.5714 \cdot 10^5)}{p^1 \cdot (2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^2)^1}$$

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

$$u_C(p) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{factor} \end{array} \right. \rightarrow 40 \cdot \frac{(27143 \cdot p + 357150 + 75 \cdot p^2)}{p \cdot (27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_{k2}(p) - L \cdot i_{2дк}$$

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow 180 \cdot \frac{(7 \cdot p + 200)}{(400000 + 7600 \cdot p + 21 \cdot p^2)}$$

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

$$N_1(p) := (3257.1 \cdot p + 2.5714 \cdot 10^5 + 9.00 \cdot p^2) \quad M_1(p) := p \cdot (2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 7.5000 \cdot p^2)$$

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

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

$$N_1(p_0) = 2.571 \times 10^5 \quad N_1(p_1) = 8.572 \times 10^4 \quad N_1(p_2) = 8.571 \times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{27143}{5} \cdot p + 142860 + \frac{45}{2} \cdot p^2$$

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad i_1(0) = 1.2$$

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 1.7999 + .16388 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - .76382 \cdot \exp(-63.923 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 40 \cdot (27143 \cdot p + 357150 + 75 \cdot p^2) \quad M_u(p) := p \cdot (27143 \cdot p + 1428600 + 75 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -63.92 \\ -297.98 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \quad p_1 = -63.92 \quad p_2 = -297.98$$

$$N_u(p_0) = 1.429 \times 10^7 \quad N_u(p_1) = -4.286 \times 10^7 \quad N_u(p_2) = -4.286 \times 10^7$$

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

$$dM_u(p_0) = 1.429 \times 10^6 \quad dM_u(p_1) = -1.122 \times 10^6 \quad dM_u(p_2) = 5.231 \times 10^6$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 40$$

$$u_C(t) \begin{cases} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{cases} \rightarrow 10. + 38.194 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) - 8.1941 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 180 \cdot (7 \cdot p + 200) \quad M_L(p) := (400000 + 7600 \cdot p + 21 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \begin{cases} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} -63.92 \\ -297.98 \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -63.92 \quad p_2 = -297.98$$

$$N_L(p_1) = -4.454 \times 10^4 \quad N_L(p_2) = -3.395 \times 10^5$$

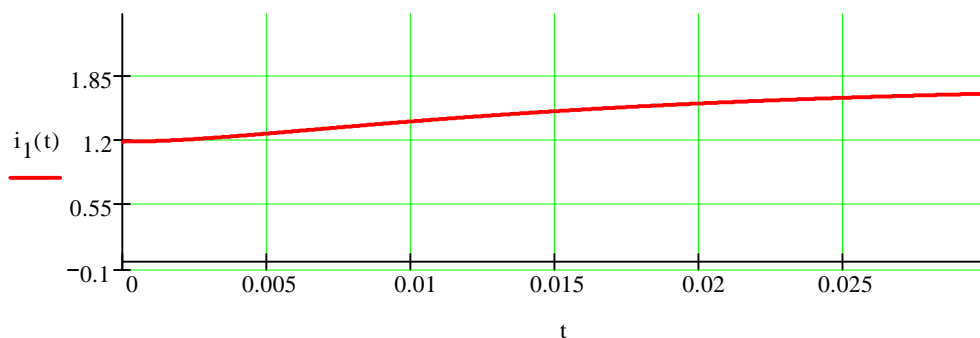
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 7600 + 42 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 4.915 \times 10^3 \quad dM_L(p_2) = -4.915 \times 10^3$$

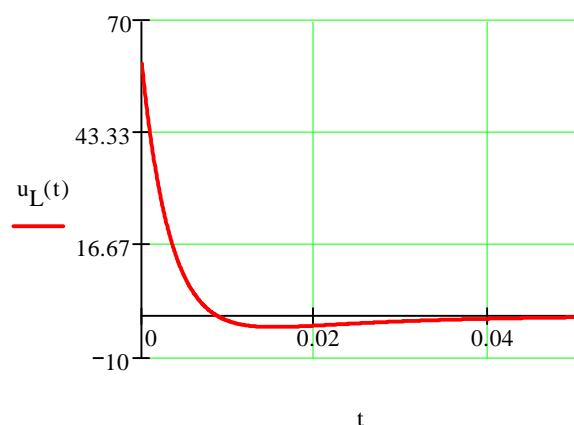
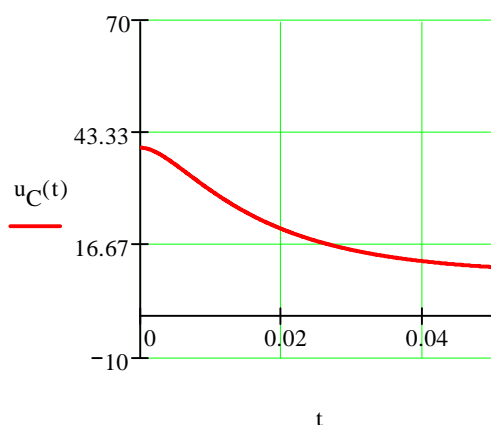
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 60.002$$

$$u_L(t) \begin{cases} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{cases} \rightarrow -9.0612 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) + 69.063 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$



Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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

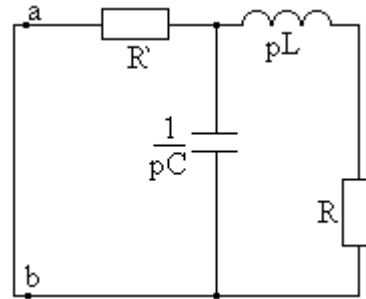
$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L\right) \cdot \mathbf{R'} + (R + p \cdot L) \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L}$$

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

$$D = 0$$

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

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



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:

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

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$X_C = 14.286$$

$$X_L := \omega \cdot L$$

$$X_L = 15$$

$$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i}$$

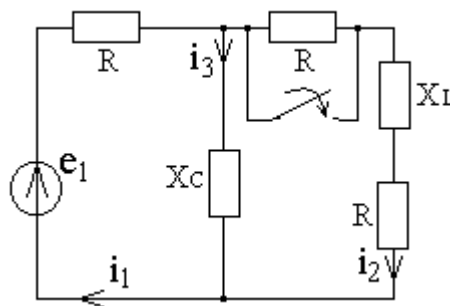
$$E_1 = 86.603 + 50i$$

$$F(E_1) = (100 \ 30)$$

$$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i}$$

$$E_2 = 69.282 + 40i$$

$$F(E_2) = (80 \ 30)$$



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

$$Z'_{vx} = 52.041 - 14.3i$$

$$\Gamma'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$$

$$\Gamma'_{1дк} = 1.302 + 1.319i$$

$$F(\Gamma'_{1дк}) = (1.853 \ 45.365)$$

$$\Gamma'_{2дк} := \Gamma'_{1дк} \cdot \frac{(-i \cdot X_C)}{2R + X_L \cdot i - i \cdot X_C}$$

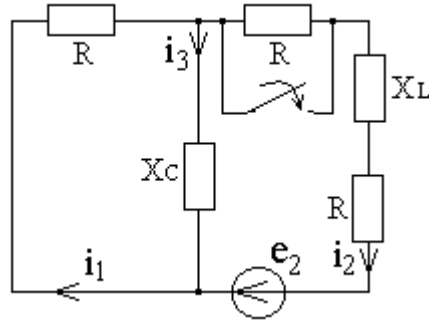
$$\Gamma'_{2дк} = 0.187 - 0.187i$$

$$F(\Gamma'_{2дк}) = (0.265 \ -45.044)$$

$$\Gamma'_{3дк} := \Gamma'_{1дк} \cdot \frac{2R + X_L \cdot i}{2R + X_L \cdot i - i \cdot X_C}$$

$$\Gamma'_{3дк} = 1.115 + 1.506i$$

$$F(\Gamma'_{3дк}) = (1.874 \ 53.487)$$



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

$$Z''_{vx} = 103.774 + 1.792i$$

$$I''_{2dk} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$$

$$I''_{2dk} = 0.674 + 0.374i$$

$$F(I''_{2dk}) = (0.771 \quad 29.01)$$

$$I''_{1dk} := I''_{2dk} \cdot \frac{(-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C}$$

$$I''_{1dk} = 0.15 - 0.15i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.212 \quad -45.044)$$

$$I''_{3dk} := I''_{2dk} \cdot \frac{R}{R - i \cdot X_C}$$

$$I''_{3dk} = 0.524 + 0.524i$$

$$F(I''_{3dk}) = (0.741 \quad 44.956)$$

$$I_{1dk} := I'_{1dk} + I''_{1dk}$$

$$I_{1dk} = 1.451 + 1.169i$$

$$F(I_{1dk}) = (1.863 \quad 38.84)$$

$$I_{2dk} := I'_{2dk} + I''_{2dk}$$

$$I_{2dk} = 0.861 + 0.187i$$

$$F(I_{2dk}) = (0.881 \quad 12.221)$$

$$I_{3dk} := I'_{3dk} - I''_{3dk}$$

$$I_{3dk} = 0.59 + 0.982i$$

$$F(I_{3dk}) = (1.146 \quad 58.992)$$

$$u_{Cdk} := I_{3dk} \cdot (-i \cdot X_C)$$

$$u_{Cdk} = 14.031 - 8.433i$$

$$F(u_{Cdk}) = (16.37 \quad -31.008)$$

$$u_{Ldk} := I_{1dk} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{Ldk} = -17.53 + 21.771i$$

$$F(u_{Ldk}) = (27.952 \quad 128.84)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = -11.926$$

$$i_{Ldk}(0) = 0.264$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 1.653$$

$$i_{20} = 0.264$$

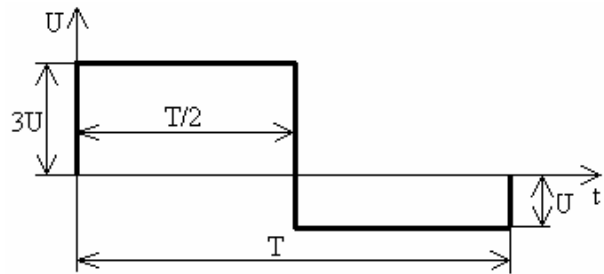
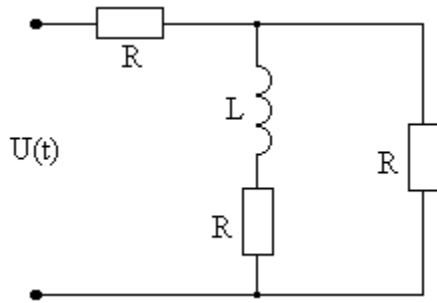
$$i_{30} = 1.389$$

$$u_{L0} = 31.454$$

$$u_{C0} = -11.926$$

Інтеграл Дюамеля

$$T := 1.0 \quad E_1 := 100 \quad E := 1$$



Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

$$u_{L\text{дк}} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

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

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -500$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

Визначення сталих інтегрування:

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

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

Отже вільна складова струму $i_1(t)$ та $i_3(t)$ будуть мати вигляд:

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

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

Повні значення цих струмів:

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

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

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

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

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

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := 3E_1 \quad U_0 = 300$$

$$U_1 := 3E_1 \quad U_1 = 300 \quad 0 < t < \frac{T}{2}$$

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

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 4. - 1. \cdot \exp(-500. \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow -1.3333 - 1. \cdot \exp(-500. \cdot t) + 1.3333 \cdot \exp(-500. \cdot t + .50000)$$

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

$$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -1. \cdot \exp(-500. \cdot t) + 1.33 \cdot \exp(-500. \cdot t + .500) - .333 \cdot \exp(-500. \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float,5} \rightarrow 150.00 \cdot \exp(-500. \cdot t)$$

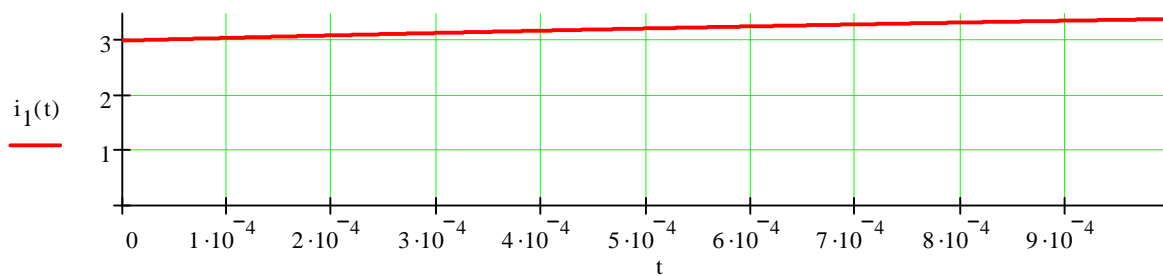
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float,5} \rightarrow 150.00 \cdot \exp(-500. \cdot t) - 200.00 \cdot \exp(-500. \cdot t + .50000)$$

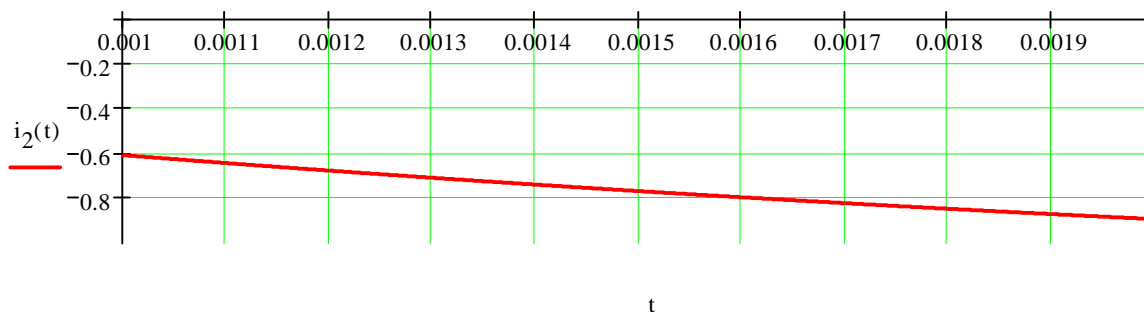
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float,5} \rightarrow 150.00 \cdot \exp(-500. \cdot t) - 200.00 \cdot \exp(-500. \cdot t + .50000) + 50.000 \cdot \exp(-500. \cdot t + 1.0000)$$

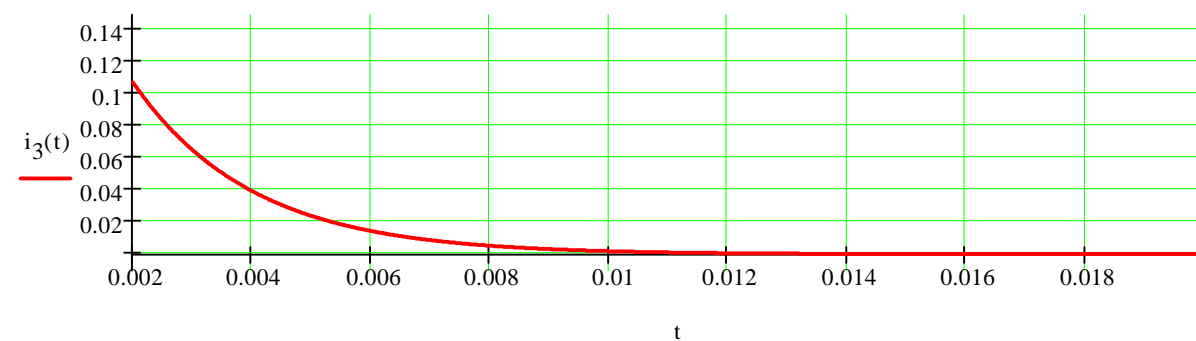
На проміжку від 0 до $1/2T$



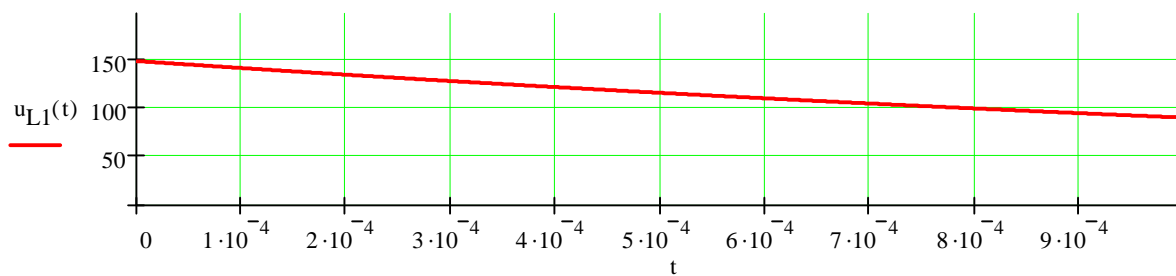
На проміжку від $1/2T$ до T



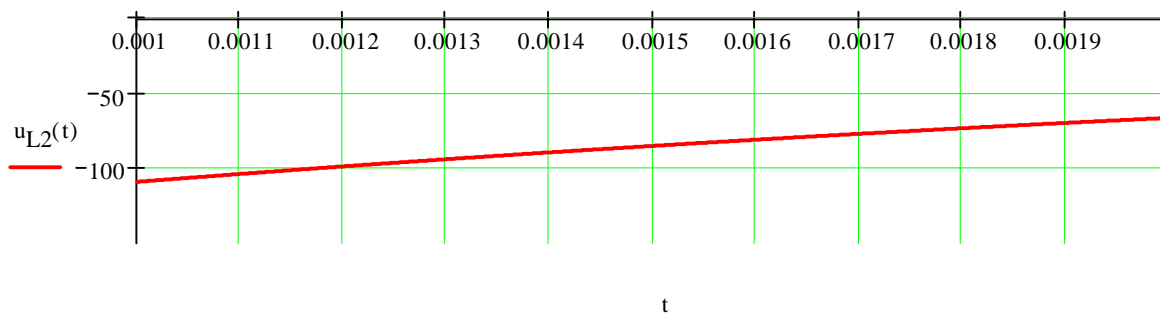
На проміжку від T до $10T$



На промежутке от 0 до $1/2T$



На промежутке от $2/3T$ до T



На промежутке от T до $10T$

