

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 905

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.

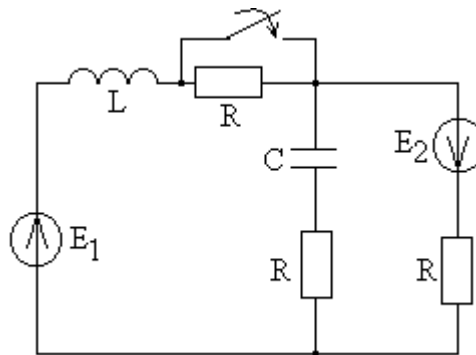
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

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.



Основна схема

Вхідні данні:

$$L := 0.19 \quad \text{Гн} \quad C := 250 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ф}$$

$$R := 70 \quad \text{Ом}$$

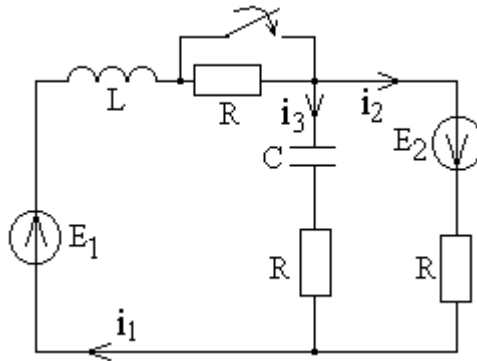
$$E_1 := 100 \quad \text{В} \quad E_2 := 80 \quad \text{В}$$

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

$$\omega := 100 \quad \text{с}^{-1}$$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 1.286$$

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

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = 10$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 2.571$$

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

$$u'_C := E_1 \quad u'_C = 100$$

Незалежні початкові умови

$$i_{10} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{10} = 1.286$$

$$u_{C0} := u_{C\text{ДК}} \quad u_{C0} = 10$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0}) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{9}{7} \\ 90 \end{pmatrix}$$

$$i_{30} = 0 \quad i_{20} = 1.286 \quad u_{L0} = 90$$

Незалежні початкові умови

$$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = 473.684$$

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

Залежні початкові умови

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0}) \quad di_{20} = 236.842 \quad di_{30} = 236.842 \quad du_{L0} = -1.658 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot p \cdot L \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -134.55 \\ -78.236 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -134.55$$

$$p_2 = -78.236$$

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:

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = -6.625 \quad A_2 = 5.34$$

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

$$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} \quad \text{float, } 5 \rightarrow -6.6253 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) + 5.3395 \cdot \exp(-78.236 \cdot t)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad \text{float, } 5 \rightarrow 2.5714 - 6.6253 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) + 5.3395 \cdot \exp(-78.236 \cdot t) \quad i_1(0) = 1.286$$

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -2.42 \quad B_2 = 1.134$$

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

$$i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t} \quad \text{float, } 5 \rightarrow -2.4195 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) + 1.1338 \cdot \exp(-78.236 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \quad \text{float, } 5 \rightarrow 2.5714 - 2.4195 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) + 1.1338 \cdot \exp(-78.236 \cdot t) \quad i_2(0) = 1.286$$

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = -4.206 \quad C_2 = 4.206$$

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

$$i''_3(t) := C_1 \cdot e^{p_1 t} + C_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float}, 5 \rightarrow -4.2057 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) + 4.2057 \cdot \exp(-78.236 \cdot t)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 5 \rightarrow -4.2057 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) + 4.2057 \cdot \exp(-78.236 \cdot t) \quad i_3(0) = 0$$

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = 125.035 \quad D_2 = -215.035$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D_1 \cdot e^{p_1 t} + D_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float}, 6 \rightarrow 125.035 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) - 215.035 \cdot \exp(-78.236 \cdot t)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 100. + 125.04 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) - 215.04 \cdot \exp(-78.236 \cdot t)$$

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

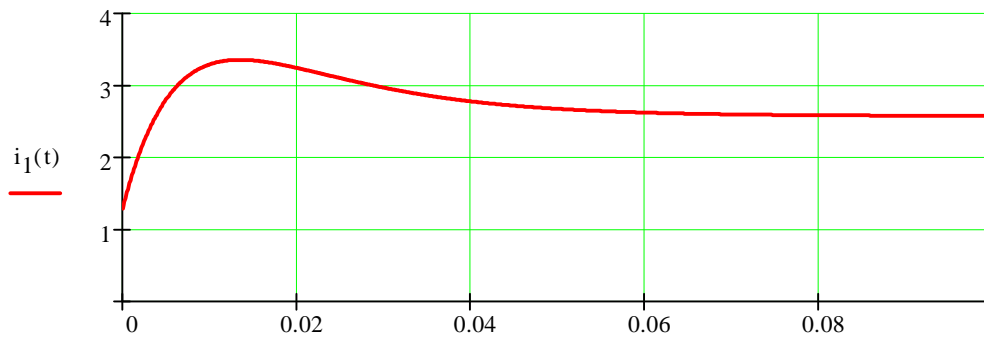
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = 169.367 \quad F_2 = -79.367$$

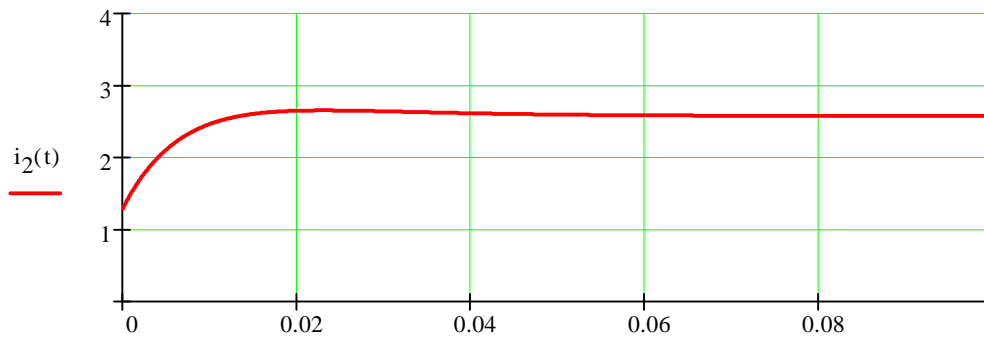
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 t} + F_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float}, 5 \rightarrow 169.37 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) - 79.367 \cdot \exp(-78.236 \cdot t)$$

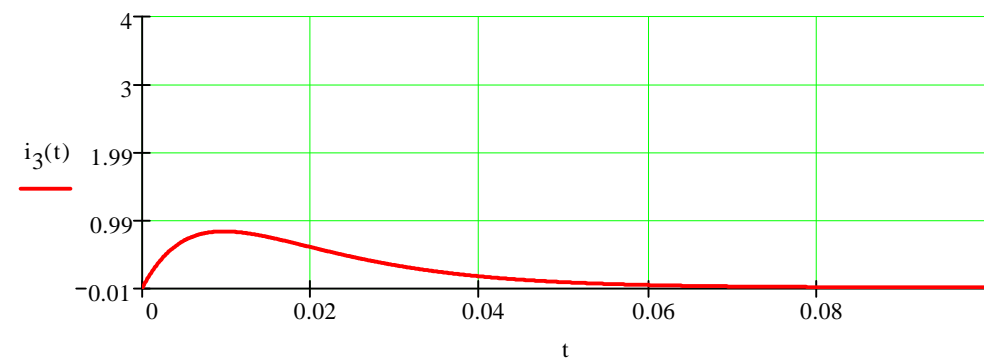
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 169.37 \cdot \exp(-134.55 \cdot t) - 79.367 \cdot \exp(-78.236 \cdot t) \quad u_L(0) = 90.003$$



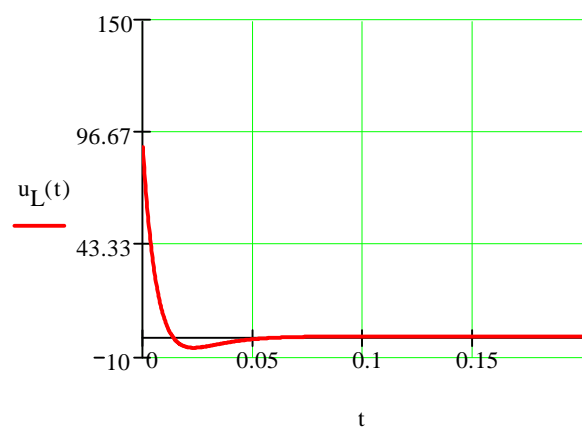
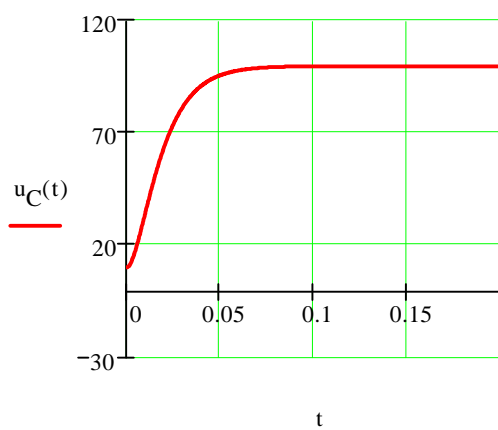
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

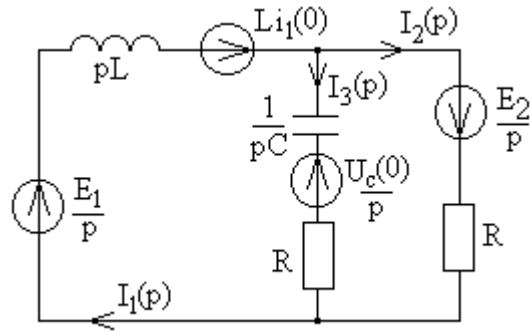


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 1.286$$

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

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = 10$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{L0} = 1.286$$

$$u_{C0} = 10$$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) - I_{k2}(p) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10}$$

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

$$\Delta(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}$$

$$\Delta(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (5660.0 \cdot p + 2.8000 \cdot 10^5 + 26.60 \cdot p^2)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}$$

$$\Delta_1(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(19877. \cdot p + 7.2000 \cdot 10^5 + 34.200 \cdot p^2)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} \\ -\left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_2(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(13577. \cdot p + 34.200 \cdot p^2 + 7.2000 \cdot 10^5)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(19877. \cdot p + 7.2000 \cdot 10^5 + 34.200 \cdot p^2)}{p^1 \cdot (5660.0 \cdot p + 2.8000 \cdot 10^5 + 26.60 \cdot p^2)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(13577. \cdot p + 34.200 \cdot p^2 + 7.2000 \cdot 10^5)}{p^1 \cdot (5660.0 \cdot p + 2.8000 \cdot 10^5 + 26.60 \cdot p^2)^1}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float,5} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{31500.}{(28300. \cdot p + 1400000. + 133. \cdot p^2)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow 10 \cdot \frac{(28300 \cdot p + 14000000 + 133 \cdot p^2)}{(28300 \cdot p + 1400000 + 133 \cdot p^2) \cdot p}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_1(p) - L \cdot i_{1\text{дк}}$$

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{19}{140} \cdot \frac{(88199 \cdot p + 2520000)}{(28300 \cdot p + 1400000 + 133 \cdot p^2)}$$

Перейдемо тепер від зображення до функції часу за формулою розкладу:
Для струму $I_1(p)$:

$$N_1(p) := 19877. \cdot p + 7.2000 \cdot 10^5 + 34.200 \cdot p^2 \quad M_1(p) := p^1 \cdot (5660.0 \cdot p + 2.8000 \cdot 10^5 + 26.60 \cdot p^2)^1$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve,p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -134.55 \\ -78.236 \end{pmatrix} \quad p_0 = 0 \quad p_1 = -134.55 \quad p_2 = -78.236$$

$$N_1(p_0) = 7.2 \times 10^5 \quad N_1(p_1) = -1.335 \times 10^6 \quad N_1(p_2) = -6.258 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor} \rightarrow 11320 \cdot p + 280000 + \frac{399}{5} \cdot p^2$$

$$dM_1(p_0) = 2.8 \times 10^5 \quad dM_1(p_1) = 2.016 \times 10^5 \quad dM_1(p_2) = -1.172 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float,3} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 2.57 - 6.62 \cdot \exp(-135. \cdot t) + 5.34 \cdot \exp(-78.2 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі $U_c(p)$:

$$N_u(p) := 10 \cdot (28300 \cdot p + 14000000 + 133 \cdot p^2) \quad M_u(p) := p \cdot (28300 \cdot p + 1400000 + 133 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve,p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -78.235 \\ -134.55 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \quad p_1 = -78.235 \quad p_2 = -134.55$$

$$N_u(p_0) = 1.4 \times 10^8 \quad N_u(p_1) = 1.26 \times 10^8 \quad N_u(p_2) = 1.26 \times 10^8$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 56600 \cdot p + 1400000 + 399 \cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 1.4 \times 10^6 \quad dM_u(p_1) = -5.859 \times 10^5 \quad dM_u(p_2) = 1.008 \times 10^6$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 9.978$$

$$u_C(t) \begin{cases} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{cases} \rightarrow 100. - 215.04 \cdot \exp(-78.235 \cdot t) + 125.02 \cdot \exp(-134.55 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{19}{140} \cdot (88199 \cdot p + 2520000) \quad M_L(p) := (28300 \cdot p + 1400000 + 133 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \begin{cases} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} -78.235 \\ -134.55 \end{pmatrix} \quad p_1 = -78.235 \quad p_2 = -134.55$$

$$N_L(p_1) = -5.945 \times 10^5 \quad N_L(p_2) = -1.269 \times 10^6$$

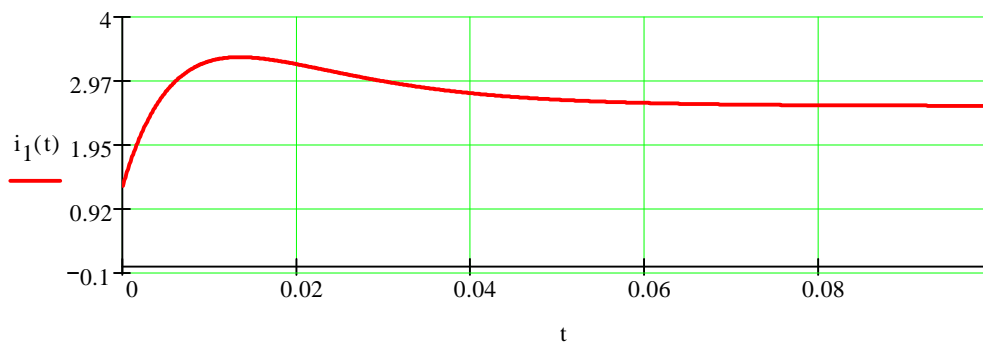
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 28300 + 266 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 7.489 \times 10^3 \quad dM_L(p_2) = -7.49 \times 10^3$$

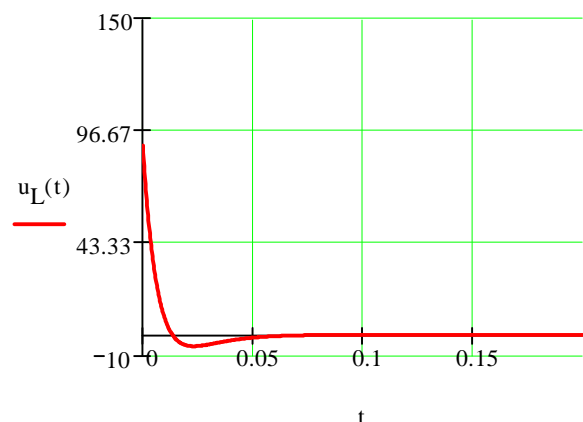
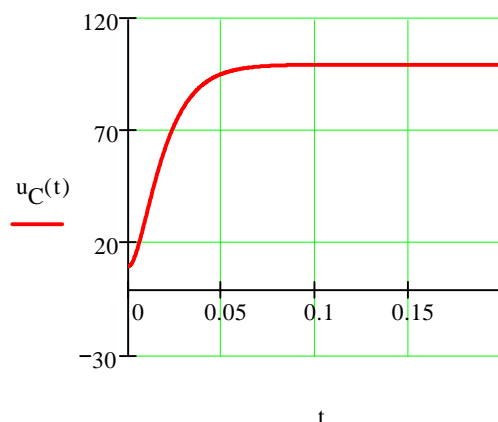
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 89.986$$

$$u_L(t) \begin{cases} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{cases} \rightarrow -79.373 \cdot \exp(-78.235 \cdot t) + 169.36 \cdot \exp(-134.55 \cdot t)$$



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

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

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

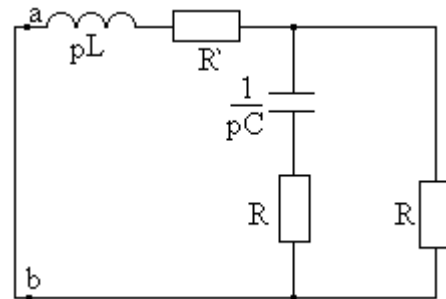
$$(2 \cdot R \cdot L) \cdot p^2 + \left(2 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right) \cdot p + \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right)^2 - 4 \cdot (2 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Big|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -57.140 \\ -2.0033 \end{pmatrix}$$

Отже ні при якому значенні активного опору у вітці з джерелом напруги Е1 аперіодичний процес не може перейти 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:

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

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

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

$$X_C = 40$$

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

$$X_L = 19$$

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

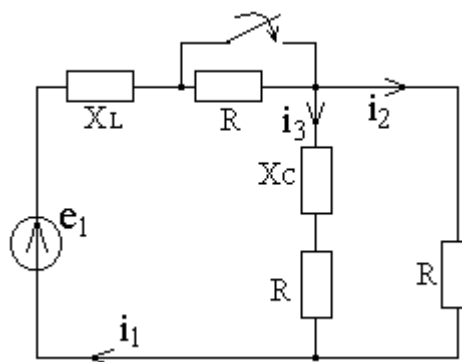
$$E_1 = 86.603 + 50i$$

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

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

$$E_2 = 69.282 + 40i$$

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



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

$$Z'_{vx} = 107.642 + 9.755i$$

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

$$\Gamma'_{1дк} = 0.84 + 0.388i$$

$$F(\Gamma'_{1дк}) = (0.925 \ 24.822)$$

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

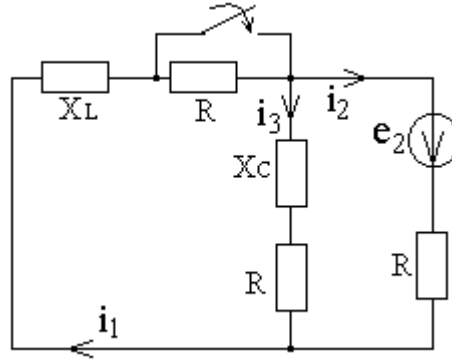
$$\Gamma'_{2дк} = 0.503 + 0.098i$$

$$F(\Gamma'_{2дк}) = (0.512 \ 11.022)$$

$$\Gamma'_{3дк} := \Gamma'_{1дк} - \Gamma'_{2дк}$$

$$\Gamma'_{3дк} = 0.337 + 0.29i$$

$$F(\Gamma'_{3дк}) = (0.445 \ 40.767)$$



$$Z''_{vx} := R + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R - i \cdot X_C} \quad Z''_{vx} = 111.079 - 4.338i$$

$$I''_{2DK} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \quad I''_{2DK} = 0.609 + 0.384i \quad F(I''_{2DK}) = (0.72 \quad 32.237)$$

$$I''_{1DK} := I''_{2DK} \cdot \frac{(R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R - i \cdot X_C} \quad I''_{1DK} = 0.402 + 0.078i \quad F(I''_{1DK}) = (0.41 \quad 11.022)$$

$$I''_{3DK} := I''_{2DK} - I''_{1DK} \quad I''_{3DK} = 0.206 + 0.306i \quad F(I''_{3DK}) = (0.369 \quad 55.953)$$

$$I_{1DK} := I'_{1DK} + I''_{1DK} \quad I_{1DK} = 1.242 + 0.467i \quad F(I_{1DK}) = (1.327 \quad 20.597)$$

$$I_{2DK} := I'_{2DK} + I''_{2DK} \quad I_{2DK} = 1.112 + 0.482i \quad F(I_{2DK}) = (1.212 \quad 23.435)$$

$$I_{3DK} := I'_{3DK} - I''_{3DK} \quad I_{3DK} = 0.13 - 0.015i \quad F(I_{3DK}) = (0.131 \quad -6.586)$$

$$u_{CDK} := I_{3DK} \cdot (-i \cdot X_C) \quad u_{CDK} = -0.602 - 5.218i \quad F(u_{CDK}) = (5.253 \quad -96.586)$$

$$u_{LDK} := I_{1DK} \cdot i \cdot X_L \quad u_{LDK} = -8.869 + 23.599i \quad F(u_{LDK}) = (25.21 \quad 110.597)$$

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

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

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

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

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

i

Початкові умови:

$$u_{CDK}(0) = -7.379$$

$$i_{LDK}(0) = 0.66$$

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$$i_{10} = 0.66$$

$$i_{20} = 0.681$$

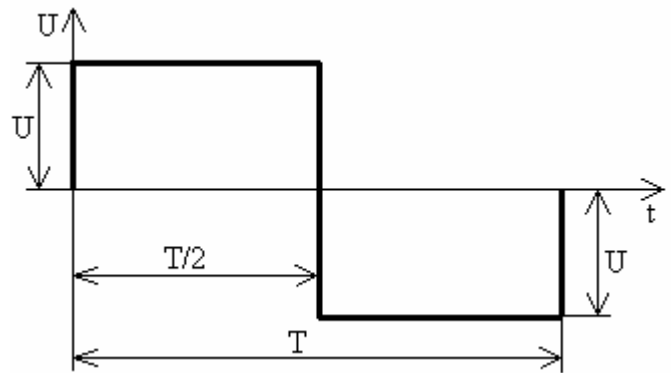
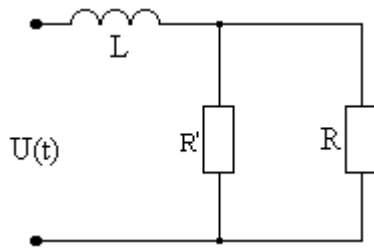
$$i_{30} = -0.021$$

$$u_{L0} = 79.581$$

$$u_{C0} = -7.379$$

Інтеграл Дюамеля

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



За допомогою класичного метода визначим:

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

$$p := \frac{R' \cdot R}{R' + R} + p \cdot L \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow -245.61$$

$$p = -245.61$$

$$T := \frac{1}{|p|} \cdot T$$

$$T = 4.071 \times 10^{-3}$$

$$i_1(t) := \frac{E}{\left(\frac{R' \cdot R}{R' + R} \right)} - \frac{E}{\left(\frac{R' \cdot R}{R' + R} \right)} \cdot e^{p \cdot t}$$

$$U_L(t) := L \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) \quad \text{float, } 5 \rightarrow .99998 \cdot \exp(-245.61 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float, } 5 \rightarrow 2.1429 \cdot 10^{-2} - 2.1429 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-245.61 \cdot t)$$

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \rightarrow .99998 \cdot \exp(-245.61 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := E_1 \quad U_0 = 100$$

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

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

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \quad \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow 2.14 - 2.14 \cdot \exp(-246 \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \text{ float, } 3 \rightarrow -2.14 - 2.14 \cdot \exp(-246 \cdot t) + 4.29 \cdot \exp(-246 \cdot t + .500)$$

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

$$i_3(t) \quad \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow -2.14 \cdot \exp(-246 \cdot t) + 4.29 \cdot \exp(-246 \cdot t + .500) - 2.14 \cdot \exp(-246 \cdot t + 1.)$$

Напряга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float},5 \rightarrow 99.998 \cdot \exp(-245.61 \cdot t)$$

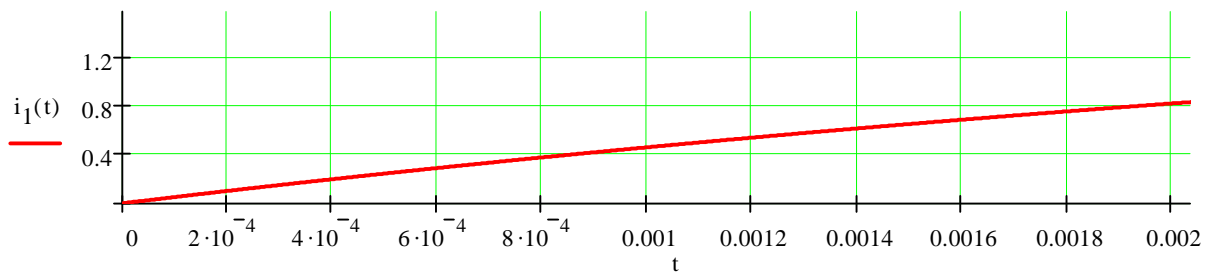
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float},5 \rightarrow 99.998 \cdot \exp(-245.61 \cdot t) - 200.00 \cdot \exp(-245.61 \cdot t + .50000)$$

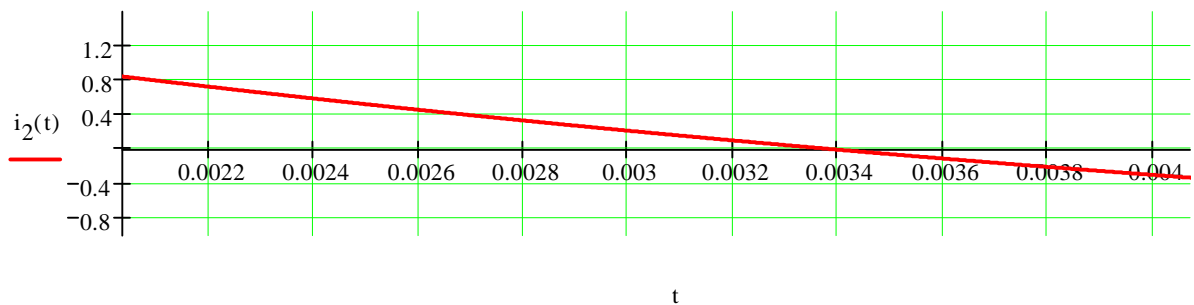
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float},5 \rightarrow 99.998 \cdot \exp(-245.61 \cdot t) - 200.00 \cdot \exp(-245.61 \cdot t + .50000) + 99.998 \cdot \exp(-245.61 \cdot t + 1.00000)$$

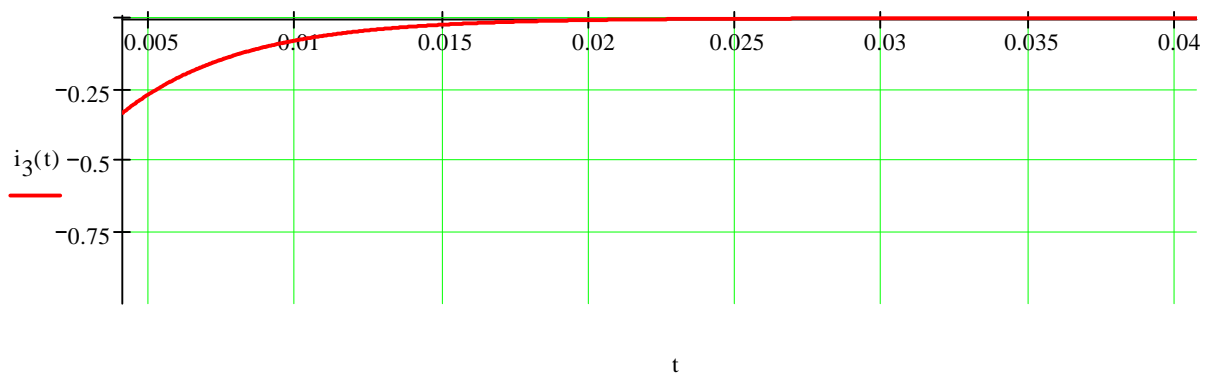
На проміжкуткє от 0 до T/2



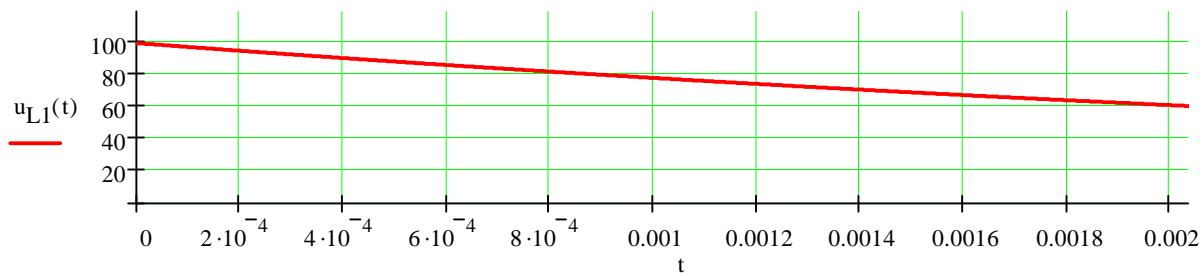
На проміжкуткє от T/2 до T



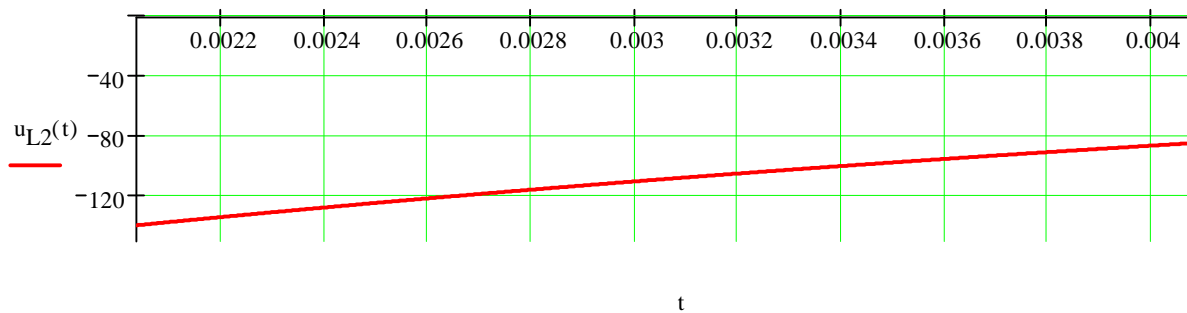
На проміжкуткє от T до 10T



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



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



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от T до $10T$

