

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

***Розрахунково-графічна робота***

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 263

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.

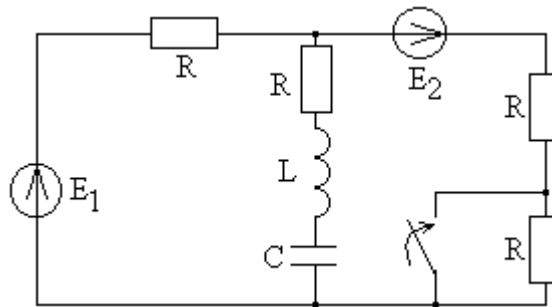
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС  $E_2$ .

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  $\tau$ ;

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



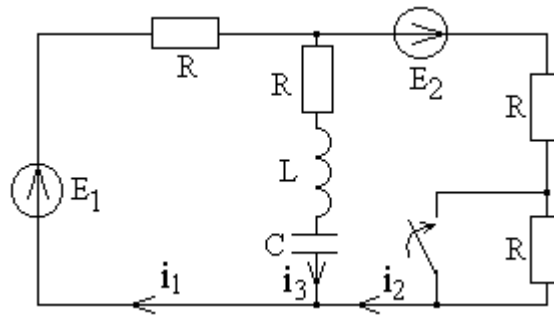
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.1$	Гн	$C := 100 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 50$	Ом		
$E_1 := 120$	В	$E_2 := 100$	В	$\psi := 150 \cdot \text{deg}$	$C^0$	$\omega := 150$	$c^{-1}$

## Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 1.467$$

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

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = 46.667$$

Усталений режим після комутації:  $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 2.2$$

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

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

Незалежні початкові умови

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

$$u_{C0} := u_{C\text{ДК}} \quad u_{C0} = 46.667$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 2.200000 \\ 2.200000 \\ -36.66667 \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = 2.2 \quad i_{20} = 2.2 \quad u_{L0} = -36.667$$

Незалежні початкові умови

$$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{30} = -366.667$$

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

## Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$$di_{10} = -183.333 \quad di_{20} = 183.333 \quad du_{L0} = 2.75 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left( 2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot R \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -576.56 \\ -173.44 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -576.56$$

$$p_2 = -173.44$$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 0.455 \quad A_2 = -0.455$$

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

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float, 7} \rightarrow 2.200000 + .4547860 \cdot \exp(-576.56 \cdot t) - .4547860 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) \quad i_1(0) = 2.2$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -0.455 \quad B_2 = 0.455$$

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

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

$$i_2(t) := i_2' + i_2''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 2.200000 - .4547860 \cdot \exp(-576.56 \cdot t) + .4547860 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) \quad i_2(0) = 2.2$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 0.91 \quad C_2 = -0.91$$

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

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

$$i_3(t) := i_3' + i_3''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow .9095721 \cdot \exp(-576.56 \cdot t) - .9095721 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) \quad i_3(0) = 0$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -15.776 \quad D_2 = 52.442$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u_C' + u_C''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 10. - 15.77562 \cdot \exp(-576.56 \cdot t) + 52.44228 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) \quad u_C(0) = 46.667$$

Given

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

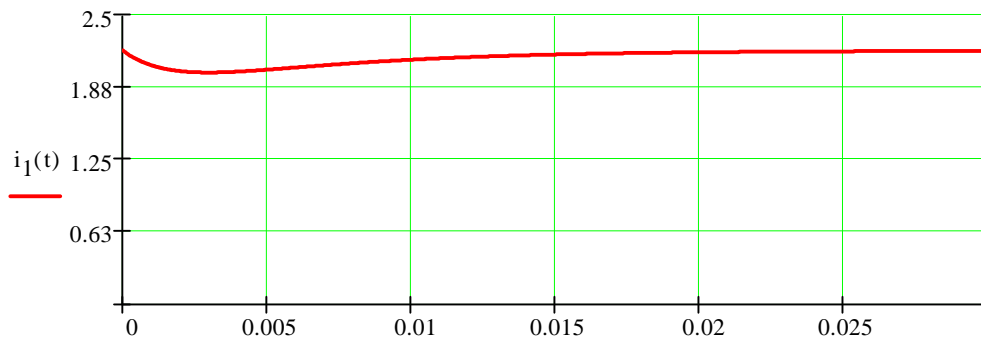
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = -52.442 \quad F_2 = 15.776$$

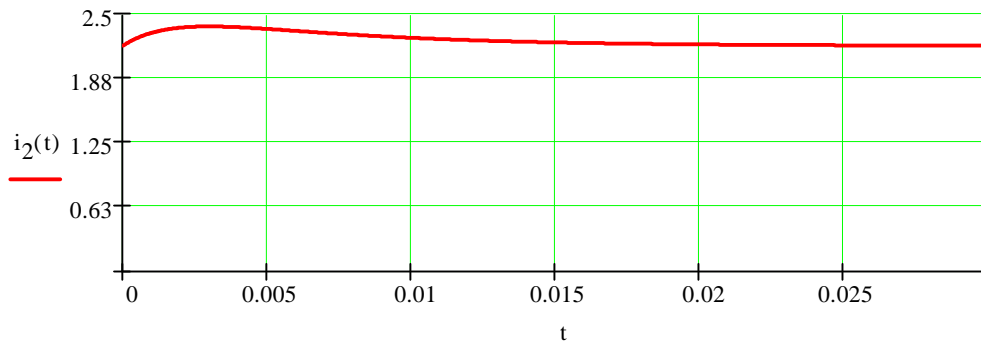
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

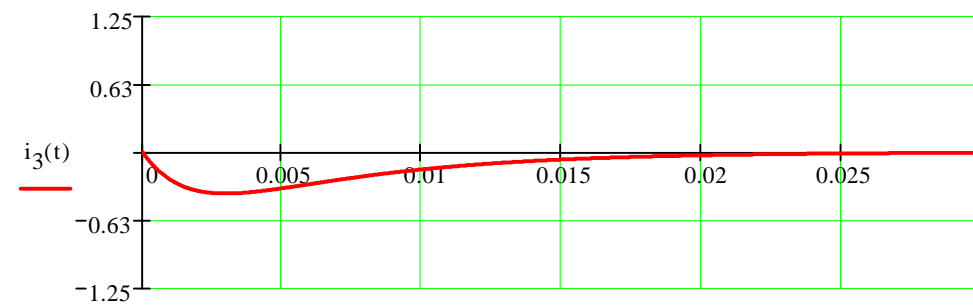
$$u_L(t) := u_L' + u_L''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -52.44229 \cdot \exp(-576.56 \cdot t) + 15.77562 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) \quad u_L(0) = -36.667$$



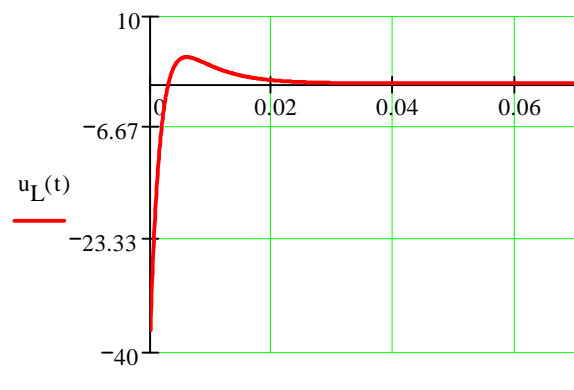
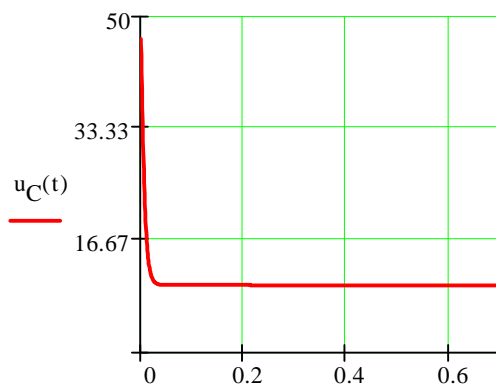
Графік перехідного струму  $i_1(t)$ .



Графік перехідного струму  $i_2(t)$ .

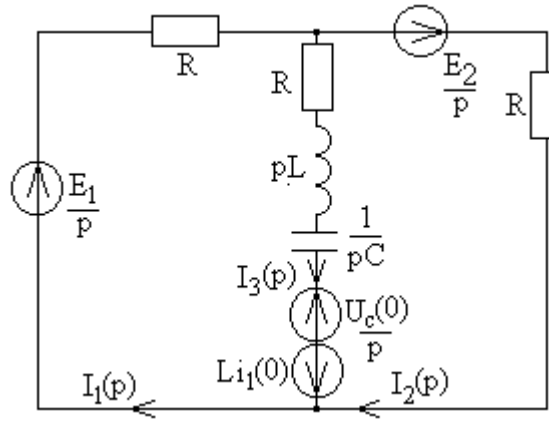


Графік перехідного струму  $i_3(t)$ .



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

## Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \quad i_{2\text{дк}} = 1.467$$

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

$$u_{C\text{дк}} := E_1 - i_{1\text{дк}} \cdot R \quad u_{C\text{дк}} = 46.667$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{3\text{дк}} \quad i_{L0} = 0$$

$$u_{C0} = 46.667$$

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

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

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^2 + 1.0000 \cdot 10^6)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} & -\left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(14667. \cdot p + 22.000 \cdot p^2 + 2.2000 \cdot 10^6)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -\left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} \end{vmatrix} \quad \Delta_2(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(18333. \cdot p + 22.000 \cdot p^2 + 2.2000 \cdot 10^6)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(14667. \cdot p + 22.000 \cdot p^2 + 2.2000 \cdot 10^6)}{p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^2 + 1.0000 \cdot 10^6)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(18333. \cdot p + 22.000 \cdot p^2 + 2.2000 \cdot 10^6)}{p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^2 + 1.0000 \cdot 10^6)^1}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-366.600000000000000000}{(750. \cdot p + p^2 + 100000.)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{20}{3} \cdot \frac{(5250 \cdot p + 7 \cdot p^2 + 150100)}{(750 \cdot p + p^2 + 100000) \cdot p}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{-1833}{50} \cdot \frac{p}{(750 \cdot p + p^2 + 100000)}$$

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

$$N_1(p) := 14667. \cdot p + 22.000 \cdot p^2 + 2.2000 \cdot 10^6 \quad M_1(p) := p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 10.0 \cdot p^2 + 1.0000 \cdot 10^6)^1$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -576.56 \\ -173.44 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -576.56$$

$$p_2 = -173.44$$

$$N_1(p_0) = 2.2 \times 10^6$$

$$N_1(p_1) = 1.057 \times 10^6$$

$$N_1(p_2) = 3.179 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 15000. \cdot p + 30. \cdot p^2 + 1.0000 \cdot 10^6$$

$$dM_1(p_0) = 1 \times 10^6$$

$$dM_1(p_1) = 2.324 \times 10^6$$

$$dM_1(p_2) = -6.992 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 3 \rightarrow 2.20 + .455 \cdot \exp(-577. \cdot t) - .455 \cdot \exp(-173. \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі  $U_c(p)$ :

$$N_u(p) := \frac{20}{3} \cdot (5250 \cdot p + 7 \cdot p^2 + 150100)$$

$$M_u(p) := p \cdot (750 \cdot p + p^2 + 100000)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -173.44 \\ -576.56 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -173.44$$

$$p_2 = -576.56$$



$$N_u(p_0) = 1.001 \times 10^6 \quad N_u(p_1) = -3.666 \times 10^6 \quad N_u(p_2) = -3.666 \times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 1500 \cdot p + 3 \cdot p^2 + 100000$$

$$dM_u(p_0) = 1 \times 10^5 \quad dM_u(p_1) = -6.992 \times 10^4 \quad dM_u(p_2) = 2.324 \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 46.668$$

$$u_C(t) \text{ float, 5} \rightarrow 10.007 + 52.434 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) - 15.773 \cdot \exp(-576.56 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{-1833}{50} \cdot p \quad M_L(p) := 750 \cdot p + p^2 + 100000$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -173.44 \\ -576.56 \end{pmatrix} \quad p_1 = -173.44 \quad p_2 = -576.56$$

$$N_L(p_1) = 6.358 \times 10^3 \quad N_L(p_2) = 2.114 \times 10^4$$

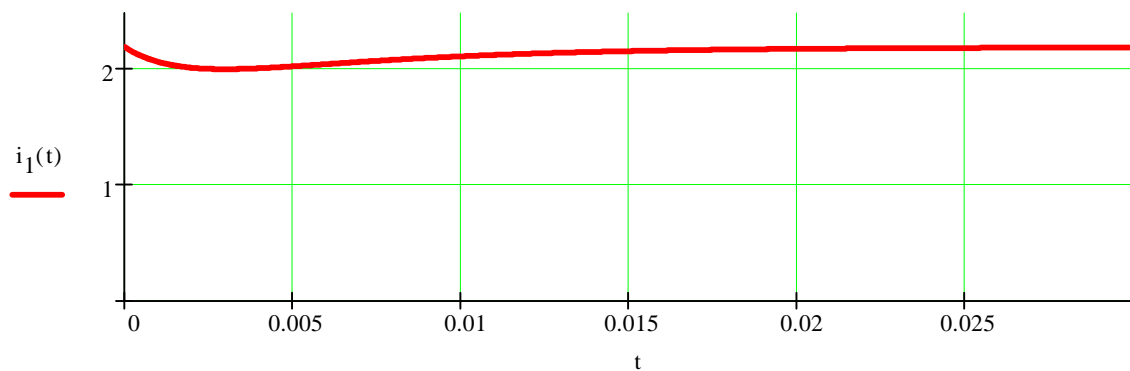
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 750 + 2 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 403.12 \quad dM_L(p_2) = -403.12$$

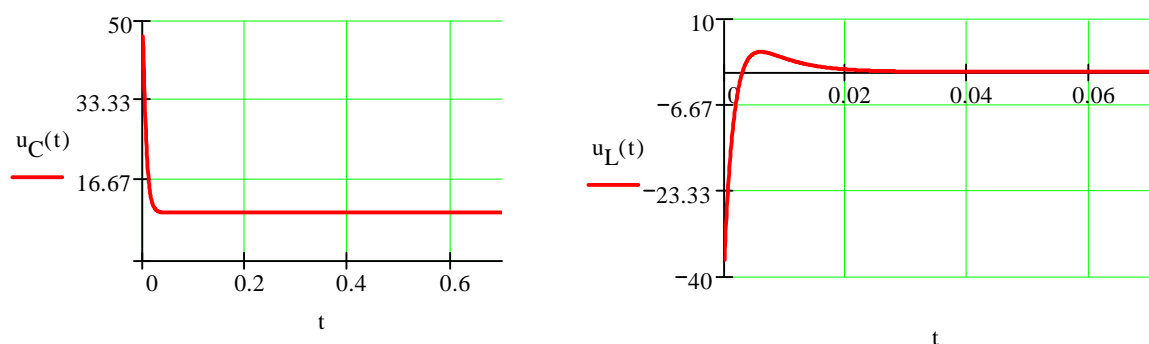
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = -36.66$$

$$u_L(t) \text{ float, 5} \rightarrow 15.773 \cdot \exp(-173.44 \cdot t) - 52.433 \cdot \exp(-576.56 \cdot t)$$



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**

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

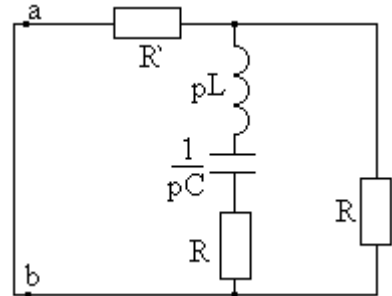
$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R\right) \cdot \mathbf{R'} + \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R}$$

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + R^2\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L + R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -34.686 \\ 18.019 \end{pmatrix}$$



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

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

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

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

$$X_C = 66.667$$

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

$$X_L = 15$$

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

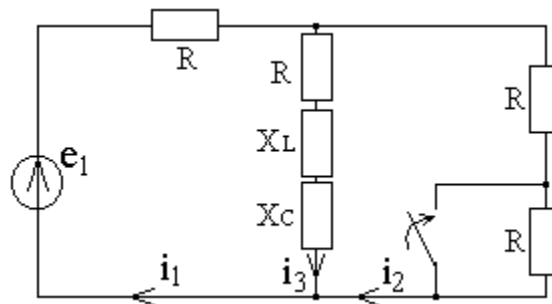
$$E_1 = -103.923 + 60i$$

$$F(E_1) = (120 \ 150)$$

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

$$E_2 = -86.603 + 50i$$

$$F(E_2) = (100 \ 150)$$



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

$$Z'_{vx} = 90.404 - 20.528i$$

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

$$\Gamma_{1\text{дк}} = -1.236 + 0.383i$$

$$F(\Gamma_{1\text{дк}}) = (1.294 \ 162.793)$$

$$\Gamma_{2\text{дк}} := \Gamma_{1\text{дк}} \cdot \frac{(R + X_L \cdot i - i \cdot X_C)}{2 \cdot R + R + X_L \cdot i - i \cdot X_C}$$

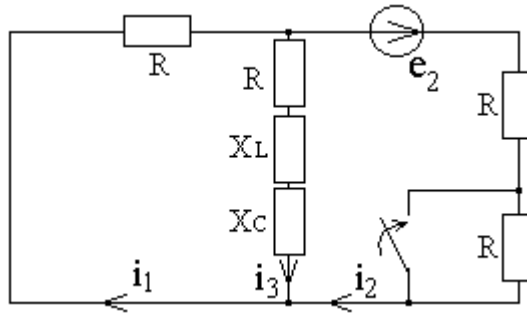
$$\Gamma_{2\text{дк}} = -0.421 + 0.409i$$

$$F(\Gamma_{2\text{дк}}) = (0.587 \ 135.86)$$

$$\Gamma_{3\text{дк}} := \Gamma_{1\text{дк}} - \Gamma_{2\text{дк}}$$

$$\Gamma_{3\text{дк}} = -0.816 - 0.026i$$

$$F(\Gamma_{3\text{дк}}) = (0.816 \ -178.201)$$



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

$$Z''_{vx} = 130.267 - 10.195i$$

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

$$I''_{2DK} = -0.691 + 0.33i$$

$$F(I''_{2DK}) = (0.765 \quad 154.475)$$

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

$$I''_{1DK} = -0.351 + 0.34i$$

$$F(I''_{1DK}) = (0.489 \quad 135.86)$$

$$I''_{3DK} := I''_{2DK} - I''_{1DK}$$

$$I''_{3DK} = -0.34 - 0.011i$$

$$F(I''_{3DK}) = (0.34 \quad -178.201)$$

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

$$I_{1DK} = -1.587 + 0.723i$$

$$F(I_{1DK}) = (1.744 \quad 155.5)$$

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

$$I_{2DK} = -1.112 + 0.738i$$

$$F(I_{2DK}) = (1.334 \quad 146.408)$$

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

$$I_{3DK} = -0.476 - 0.015i$$

$$F(I_{3DK}) = (0.476 \quad -178.201)$$

$$u_{CDK} := I_{3DK} \cdot (-i \cdot X_C)$$

$$u_{CDK} = -0.996 + 31.714i$$

$$F(u_{CDK}) = (31.73 \quad 91.799)$$

$$u_{LDK} := I_{3DK} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{LDK} = 0.224 - 7.136i$$

$$F(u_{LDK}) = (7.139 \quad -88.201)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{CDK}(0) = 44.85$$

$$i_{LDK}(0) = -0.021$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 1.545$$

$$i_{20} = 1.566$$

$$i_{30} = -0.021$$

$$u_{L0} = -36.195$$

$$u_{C0} = 44.85$$

## Інтеграл Дюамеля

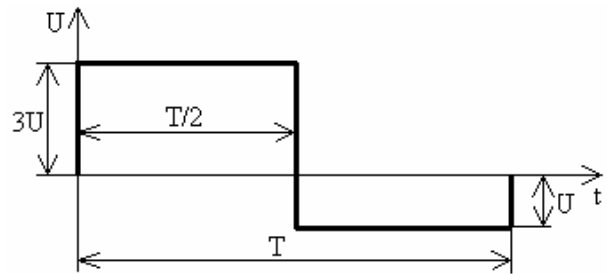
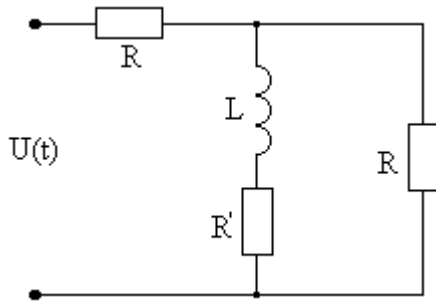
$$T := 1.0$$

$$E_1 := 120$$

$$E := 1$$

$$R' := R + R$$

$$R' = 100$$



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:  $t = \infty$

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

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

$$u'_L := 0$$

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

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

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

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

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

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

Визначення сталих інтегрування:

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

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

Отже вільна складова струму  $i_1(t)$  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:

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

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

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

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

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

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := 3E_1 \quad U_0 = 360$$

$$U_1 := 3E_1 \quad U_1 = 360 \quad 0 < t < \frac{T}{2}$$

$$U_2 := -E_1 \quad U_2 = -120 \quad \frac{T}{2} < t < T$$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 4.32 - .720 \cdot \exp(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow -1.4400 - .72000 \cdot \exp(-1250 \cdot t) + .96000 \cdot \exp(-1250 \cdot t + .50000)$$

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

$$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -.720 \cdot \exp(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t) + .960 \cdot \exp(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t + .500) - .240 \cdot \exp(-1.25 \cdot 10^3 \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float},5 \rightarrow 180.00 \cdot \exp(-1250 \cdot t)$$

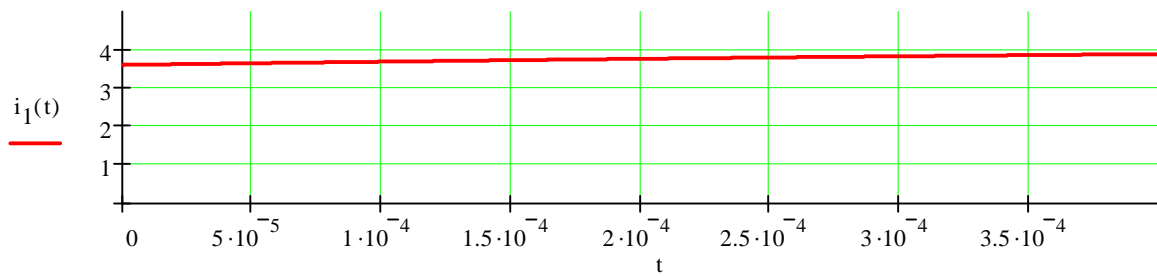
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float},5 \rightarrow 180.00 \cdot \exp(-1250 \cdot t) - 240.00 \cdot \exp(-1250 \cdot t + .50000)$$

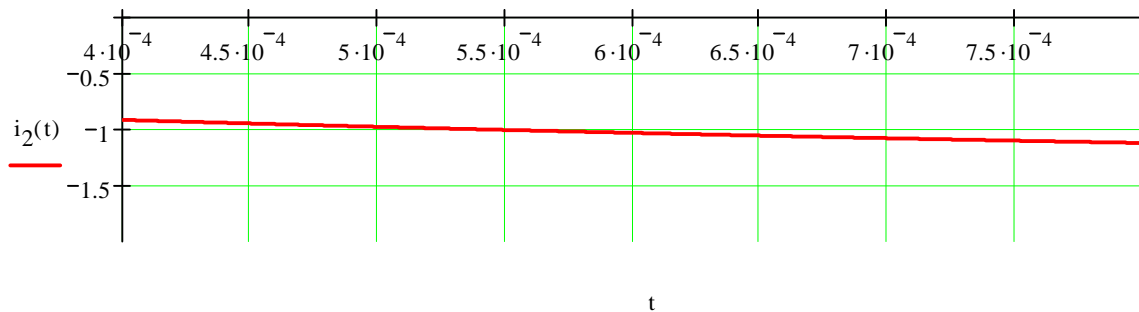
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float},5 \rightarrow 180.00 \cdot \exp(-1250 \cdot t) - 240.00 \cdot \exp(-1250 \cdot t + .50000) + 60.000 \cdot \exp(-1250 \cdot t + 1.0000)$$

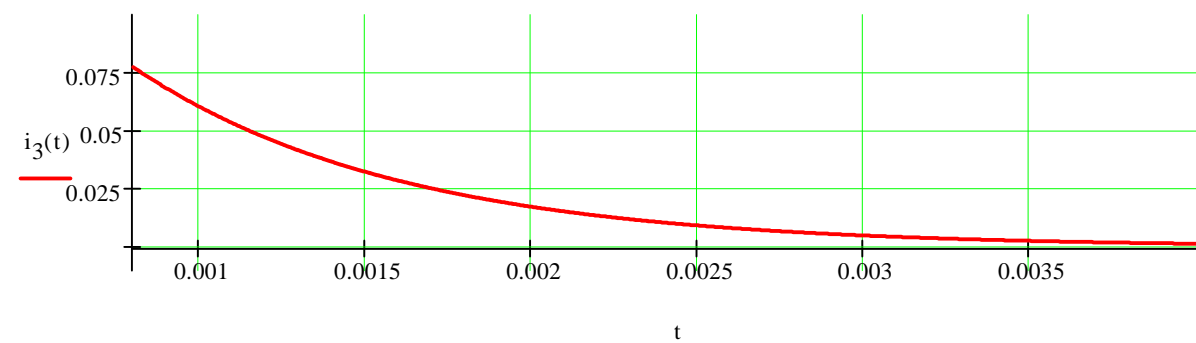
На проміжку від 0 до  $1/2T$



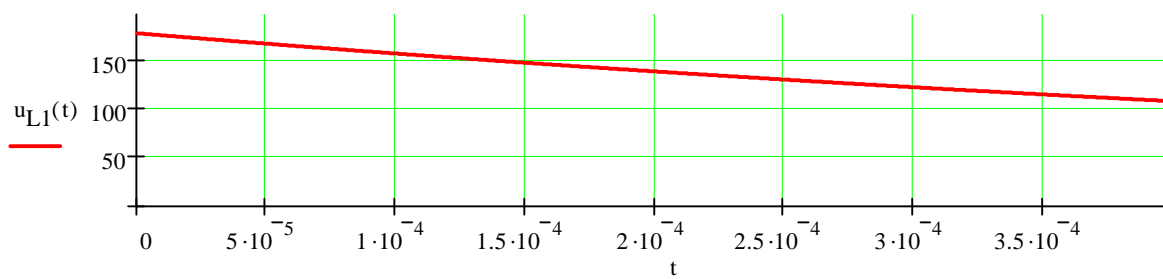
На проміжку від  $1/2T$  до  $T$



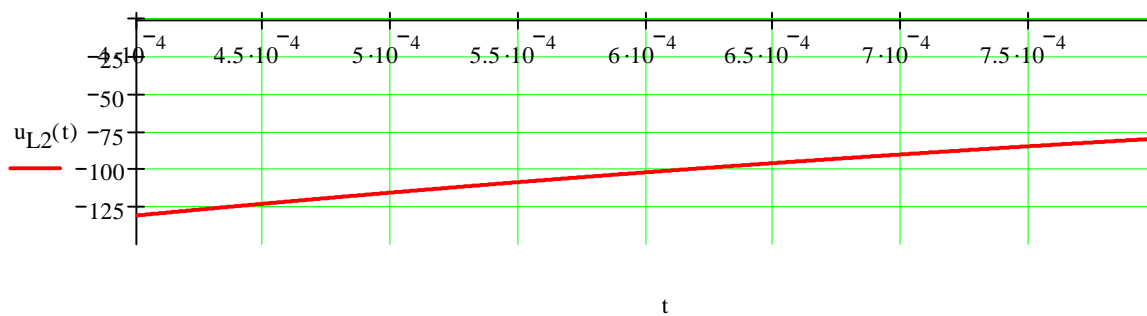
На проміжку від  $T$  до  $5T$



На промежутке от 0 до  $1/2T$



На промежутке от  $1/2T$  до  $T$



На промежутке от  $T$  до  $10T$

