

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 163

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.

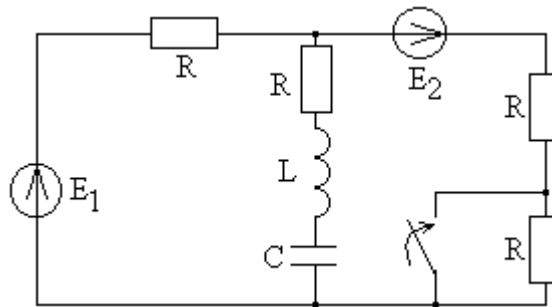
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

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.



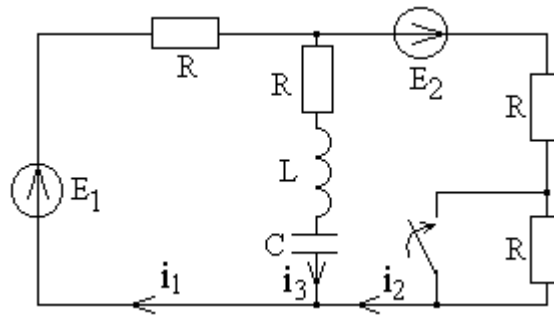
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.2$	Гн	$C := 170 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 80$	Ом		
$E_1 := 120$	В	$E_2 := 100$	В	$\psi := 150 \cdot \text{deg}$	C^0	$\omega := 150$	с^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 0.917$$

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 1.375$$

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

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

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

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.375000 \\ 1.375000 \\ -36.66667 \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = 1.375 \quad i_{20} = 1.375 \quad u_{L0} = -36.667$$

Незалежні початкові умови

$$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{30} = -183.333$$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$$di_{10} = -91.667 \quad di_{20} = 91.667 \quad du_{L0} = 2.2 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left(2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot R \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -546.15 \\ -53.853 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -546.15$$

$$p_2 = -53.853$$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 0.186 \quad A_2 = -0.186$$

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

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad \text{float, 7} \rightarrow 1.375000 + .1862020 \cdot \exp(-546.15 \cdot t) - .1862020 \cdot \exp(-53.853 \cdot t) \quad i_1(0) = 1.375$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -0.186 \quad B_2 = 0.186$$

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

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

$$i_2(t) := i_2' + i_2''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.375000 - .1862020 \cdot \exp(-546.15 \cdot t) + .1862020 \cdot \exp(-53.853 \cdot t) \quad i_2(0) = 1.375$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 0.372 \quad C_2 = -0.372$$

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

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

$$i_3(t) := i_3' + i_3''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow .3724040 \cdot \exp(-546.15 \cdot t) - .3724040 \cdot \exp(-53.853 \cdot t) \quad i_3(0) = 0$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -4.011 \quad D_2 = 40.678$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u_C' + u_C''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 10. - 4.011014 \cdot \exp(-546.15 \cdot t) + 40.67768 \cdot \exp(-53.853 \cdot t) \quad u_C(0) = 46.667$$

Given

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

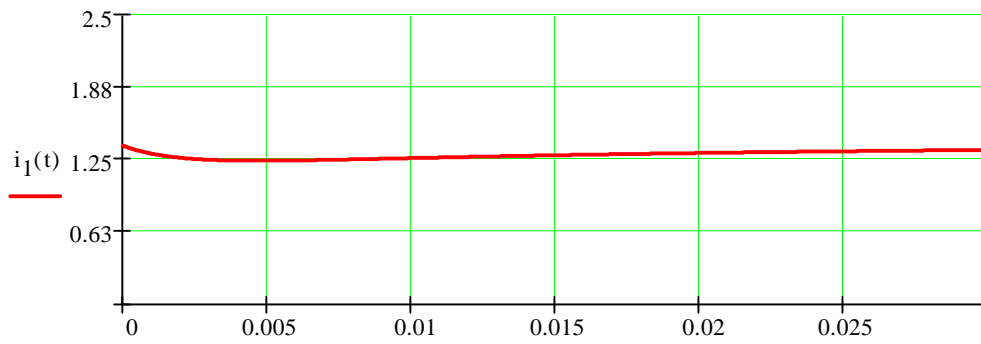
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = -40.677 \quad F_2 = 4.011$$

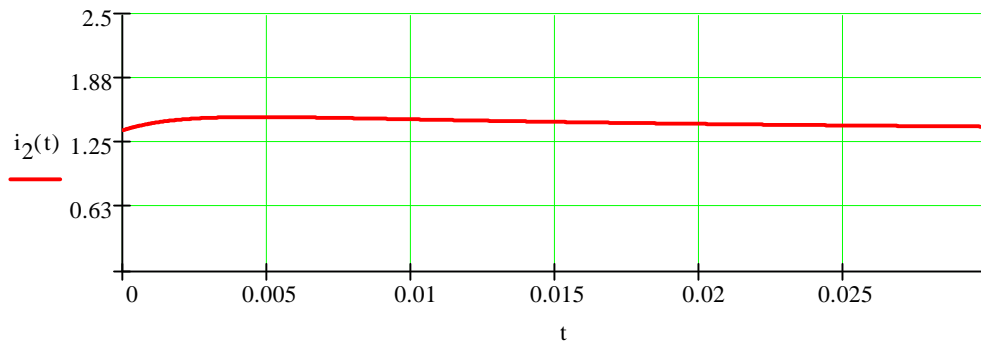
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

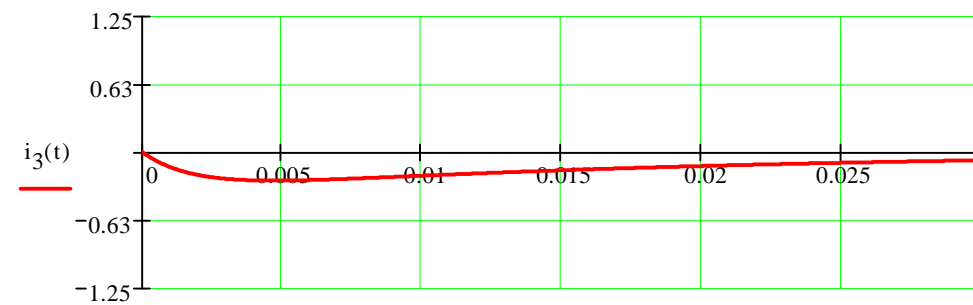
$$u_L(t) := u_L' + u_L''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -40.67746 \cdot \exp(-546.15 \cdot t) + 4.010791 \cdot \exp(-53.853 \cdot t) \quad u_L(0) = -36.667$$



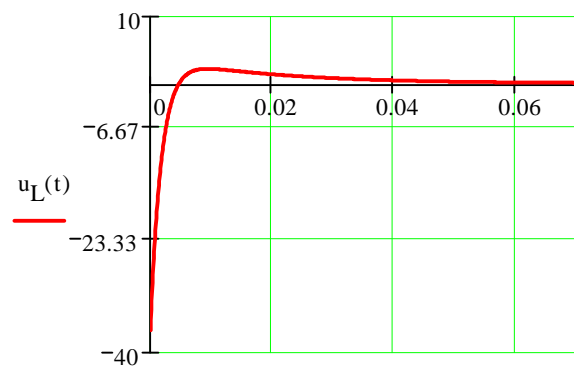
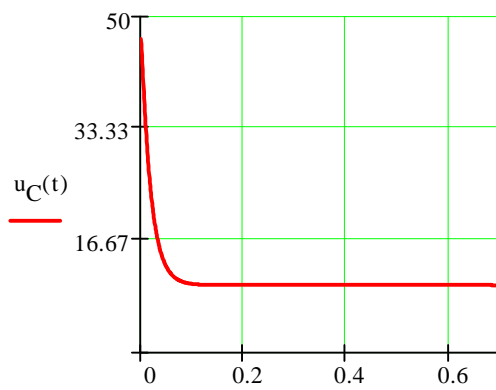
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

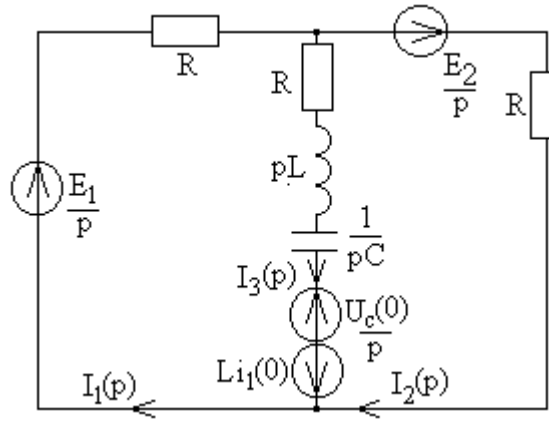


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \quad i_{2\text{дк}} = 0.917$$

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

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

Початкові умови:

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

$$u_{C0} = 46.667$$

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

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

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (19200 \cdot p + 32.0 \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(23467 \cdot p + 44.000 \cdot p^2 + 1.2941 \cdot 10^6)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} \end{vmatrix} \quad \Delta_2(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(29333 \cdot p + 44.000 \cdot p^2 + 1.2941 \cdot 10^6)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(23467. \cdot p + 44.000 \cdot p^2 + 1.2941 \cdot 10^6)}{p^1 \cdot (19200. \cdot p + 32.0 \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5)}^1.$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(29333. \cdot p + 44.000 \cdot p^2 + 1.2941 \cdot 10^6)}{p^1 \cdot (19200. \cdot p + 32.0 \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5)}^1.$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float},5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-1466.5000000000000000}{(4800. \cdot p + 8. \cdot p^2 + 235295.)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{140}{51} \cdot \frac{(81600 \cdot p + 136 \cdot p^2 + 857515)}{(4800 \cdot p + 8 \cdot p^2 + 235295) \cdot p}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{-2933}{10} \cdot \frac{p}{(4800 \cdot p + 8 \cdot p^2 + 235295)}$$

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

$$N_1(p) := 23467. \cdot p + 44.000 \cdot p^2 + 1.2941 \cdot 10^6 \quad M_1(p) := p^1 \cdot (19200. \cdot p + 32.0 \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5)^1.$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve},p \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -546.15 \\ -53.853 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -546.15$$

$$p_2 = -19.835$$

$$N_1(p_0) = 1.294 \times 10^6$$

$$N_1(p_1) = 1.602 \times 10^6$$

$$N_1(p_2) = 1.579 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow 38400. \cdot p + 96. \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5$$

$$dM_1(p_0) = 9.412 \times 10^5 \quad dM_1(p_1) = 8.604 \times 10^6$$

$$dM_1(p_2) = -8.484 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float},3 \rightarrow 1.37 + .186 \cdot \exp(-546. \cdot t) - .186 \cdot \exp(-53.9 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі $U_c(p)$:

$$N_u(p) := \frac{140}{51} \cdot (81600 \cdot p + 136 \cdot p^2 + 857515)$$

$$M_u(p) := p \cdot (4800 \cdot p + 8 \cdot p^2 + 235295)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve},p \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -53.85 \\ -546.15 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -53.85$$

$$p_2 = -546.15$$

$$N_u(p_0) = 2.354 \times 10^6 \quad N_u(p_1) = -8.626 \times 10^6 \quad N_u(p_2) = -8.626 \times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 9600 \cdot p + 24 \cdot p^2 + 235295$$

$$dM_u(p_0) = 2.353 \times 10^5 \quad dM_u(p_1) = -2.121 \times 10^5 \quad dM_u(p_2) = 2.151 \times 10^6$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 46.669$$

$$u_C(t) \text{ float, 5} \rightarrow 10.004 + 40.675 \cdot \exp(-53.85 \cdot t) - 4.0102 \cdot \exp(-546.15 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{-2933}{10} \cdot p \quad M_L(p) := 4800 \cdot p + 8 \cdot p^2 + 235295$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -53.85 \\ -546.15 \end{pmatrix} \quad p_1 = -53.85 \quad p_2 = -546.15$$

$$N_L(p_1) = 1.579 \times 10^4 \quad N_L(p_2) = 1.602 \times 10^5$$

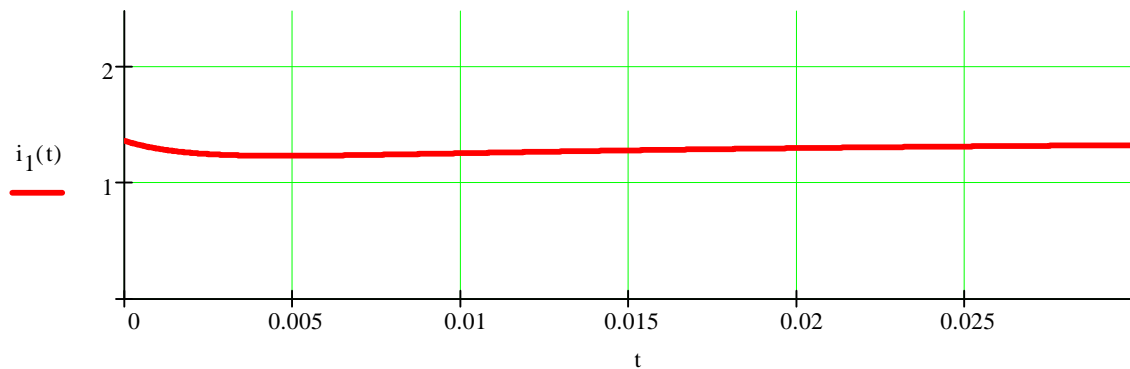
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 4800 + 16 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 3.938 \times 10^3 \quad dM_L(p_2) = -3.938 \times 10^3$$

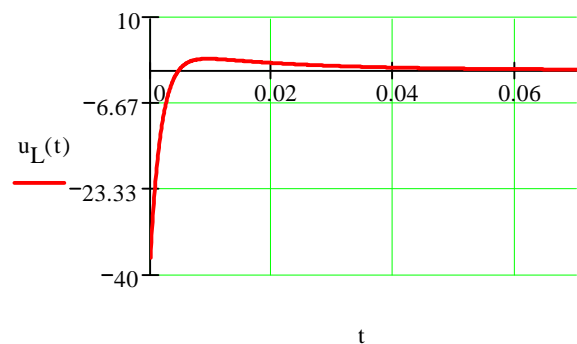
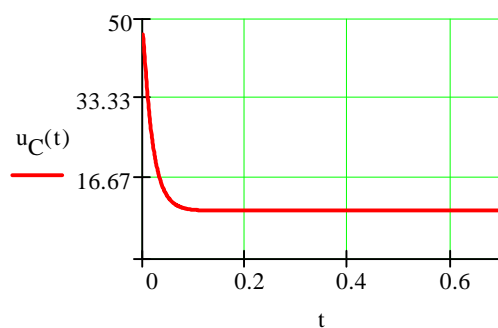
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = -36.663$$

$$u_L(t) \text{ float, 5} \rightarrow 4.0103 \cdot \exp(-53.85 \cdot t) - 40.673 \cdot \exp(-546.15 \cdot t)$$



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

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

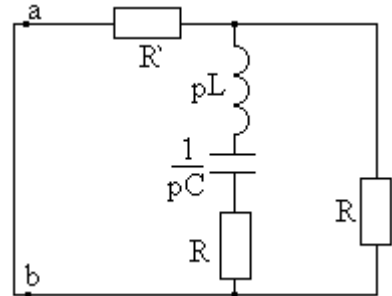
$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R\right) \cdot \mathbf{R'} + \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R}$$

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + R^2\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L + R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -52.003 \\ -9.9786 \end{pmatrix}$$



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:

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

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

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

$$X_C = 39.216$$

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

$$X_L = 30$$

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

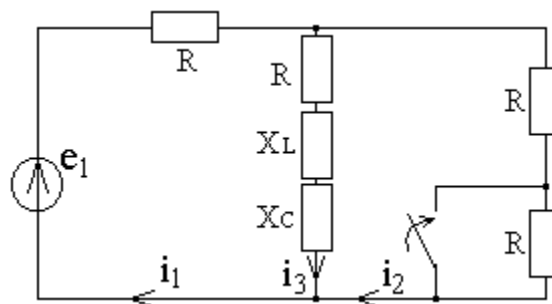
$$E_1 = -103.923 + 60i$$

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

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

$$E_2 = -86.603 + 50i$$

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



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

$$Z'_{vx} = 133.49 - 4.09i$$

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

$$\Gamma_{1\text{дк}} = -0.792 + 0.425i$$

$$F(\Gamma_{1\text{дк}}) = (0.899 \ 151.755)$$

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

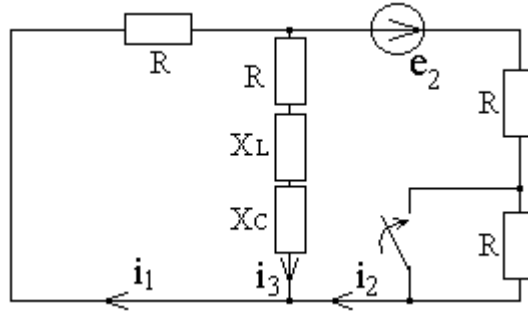
$$\Gamma_{2\text{дк}} = -0.254 + 0.162i$$

$$F(\Gamma_{2\text{дк}}) = (0.301 \ 147.383)$$

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

$$\Gamma_{3\text{дк}} = -0.538 + 0.263i$$

$$F(\Gamma_{3\text{дк}}) = (0.599 \ 153.954)$$



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

$$Z''_{vx} = 200.132 - 2.296i$$

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

$$I''_{2dk} = -0.436 + 0.245i$$

$$F(I''_{2dk}) = (0.5 \quad 150.657)$$

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

$$I''_{1dk} = -0.211 + 0.135i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.251 \quad 147.383)$$

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

$$I''_{3dk} = -0.224 + 0.11i$$

$$F(I''_{3dk}) = (0.249 \quad 153.954)$$

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

$$I_{1dk} = -1.003 + 0.561i$$

$$F(I_{1dk}) = (1.149 \quad 150.8)$$

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

$$I_{2dk} = -0.689 + 0.407i$$

$$F(I_{2dk}) = (0.801 \quad 149.426)$$

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

$$I_{3dk} = -0.314 + 0.153i$$

$$F(I_{3dk}) = (0.349 \quad 153.954)$$

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

$$u_{Cdk} = 6.012 + 12.302i$$

$$F(u_{Cdk}) = (13.693 \quad 63.954)$$

$$u_{Ldk} := I_{3dk} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{Ldk} = -4.6 - 9.411i$$

$$F(u_{Ldk}) = (10.475 \quad -116.046)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = 17.398$$

$$i_{Ldk}(0) = 0.217$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 1.081$$

$$i_{20} = 0.864$$

$$i_{30} = 0.217$$

$$u_{L0} = -36.346$$

$$u_{C0} = 17.398$$

Інтеграл Дюамеля

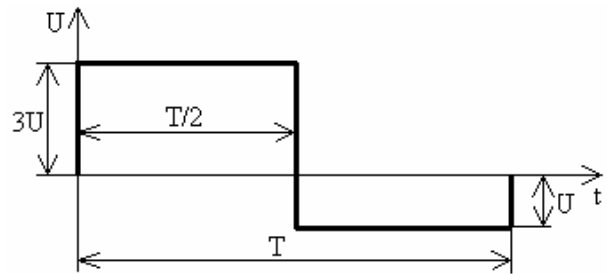
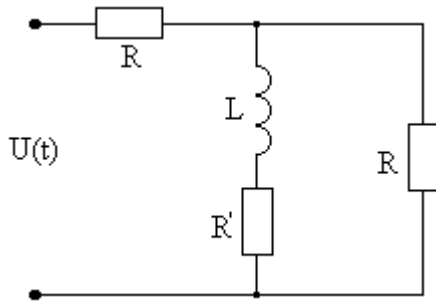
$$T := 1.0$$

$$E_1 := 120$$

$$E := 1$$

$$R' := R + R$$

$$R' = 160$$



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: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R'}{R + R'}\right) + R} \quad i'_1 = 7.5 \times 10^{-3}$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R'} \quad i'_3 = 2.5 \times 10^{-3} \quad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R'}{R + R'} \quad i'_2 = 5 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \quad i_{10} = 6.25 \times 10^{-3} \quad i_{20} = 6.25 \times 10^{-3} \quad i_{30} = 0 \quad u_{L0} = 0.5$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R' + R) + R \cdot (p \cdot L + R') \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow -1000. \quad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \quad T = 1 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -1 \times 10^3$$

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:

$$A_1 := i'_{10} - i'_1 \quad A_1 = -1.25 \times 10^{-3}$$

$$B_1 := i'_{30} - i'_3 \quad B_1 = -2.5 \times 10^{-3}$$

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:

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad i_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 7.5000 \cdot 10^{-3} - 1.2500 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1000. \cdot t)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \quad i_3(t) \text{ float,5} \rightarrow 2.5000 \cdot 10^{-3} - 2.5000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1000. \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 7.5000 \cdot 10^{-3} - 1.2500 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-1000. \cdot t)$$

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

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float,5} \rightarrow .50000 \cdot \exp(-1000. \cdot t)$$

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:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 2.70 - .450 \cdot \exp(-1.00 \cdot 10^3 \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow -.90000 - .45000 \cdot \exp(-1000. \cdot t) + .60000 \cdot \exp(-1000. \cdot t + .50000)$$

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

$$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -.450 \cdot \exp(-1.00 \cdot 10^3 \cdot t) + .600 \cdot \exp(-1.00 \cdot 10^3 \cdot t + .500) - .150 \cdot \exp(-1.00 \cdot 10^3 \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float},5 \rightarrow 180.00 \cdot \exp(-1000. \cdot t)$$

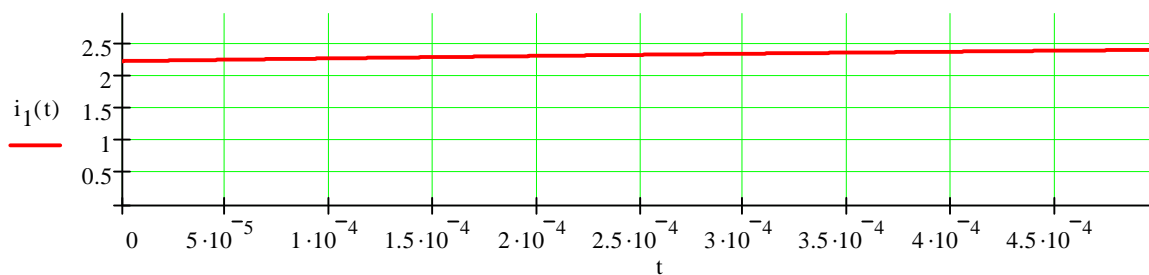
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float},5 \rightarrow 180.00 \cdot \exp(-1000. \cdot t) - 240.00 \cdot \exp(-1000. \cdot t + .50000)$$

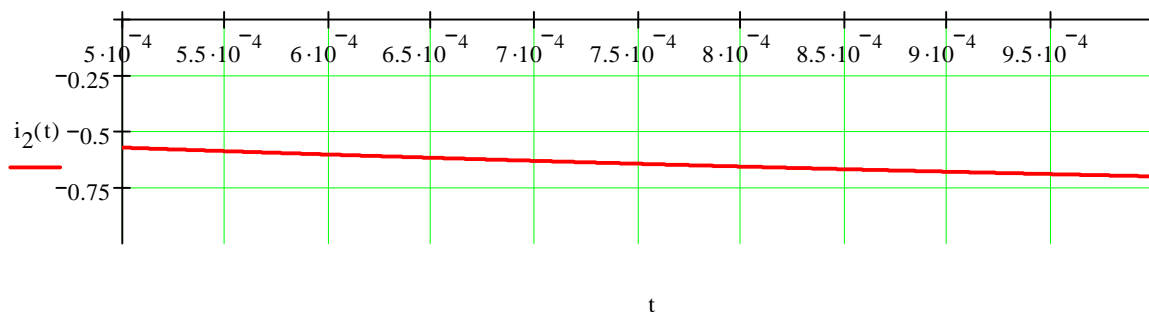
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float},5 \rightarrow 180.00 \cdot \exp(-1000. \cdot t) - 240.00 \cdot \exp(-1000. \cdot t + .50000) + 60.000 \cdot \exp(-1000. \cdot t + 1.0000)$$

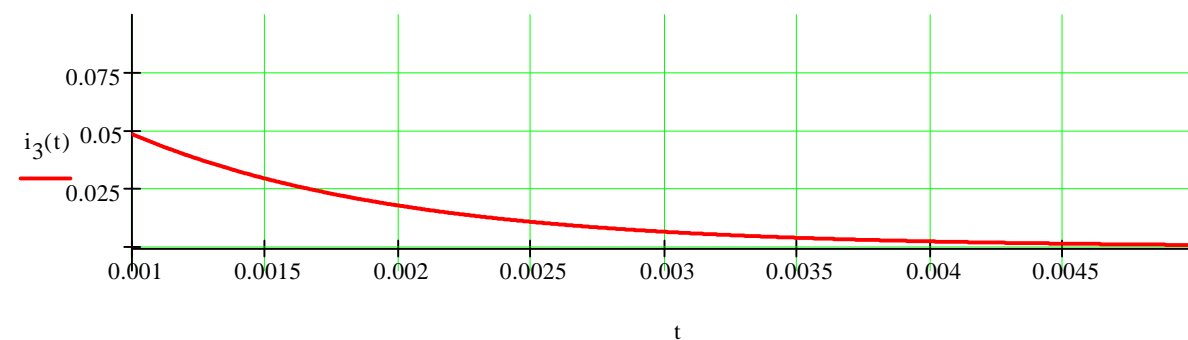
На проміжкуткє от 0 до 1/2T



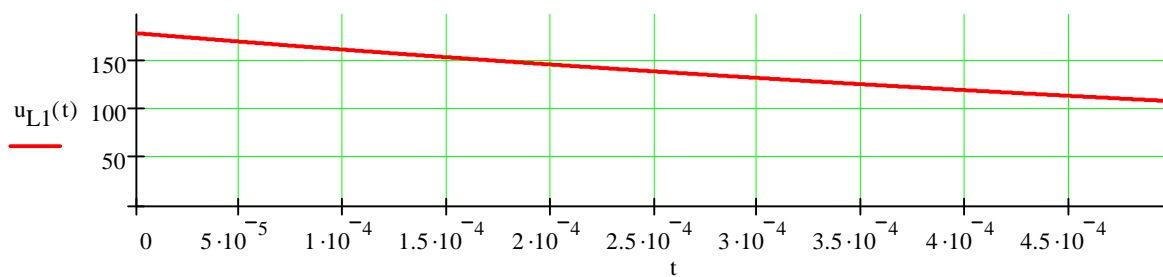
На проміжкуткє от 1/2T до T



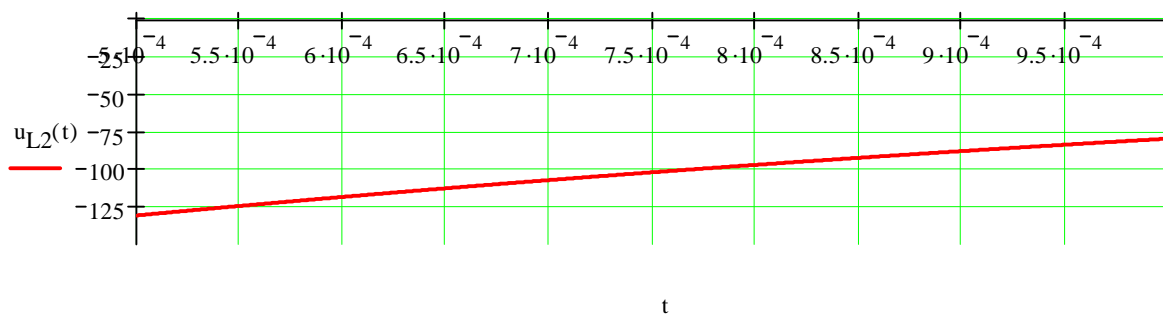
На проміжкуткє от T до 5T



На промежутке от 0 до $1/2T$



На промежутке от $1/2T$ до T



На промежутке от T до $10T$

