

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 656

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.

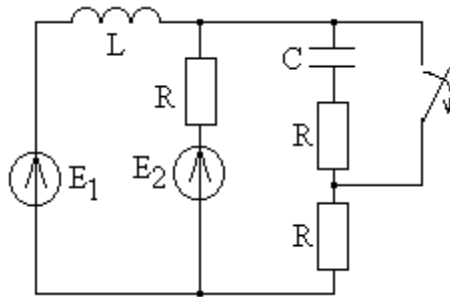
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

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:

$$L := 0.125 \text{ Гн} \quad C := 70 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$R := 40 \text{ Ом}$$

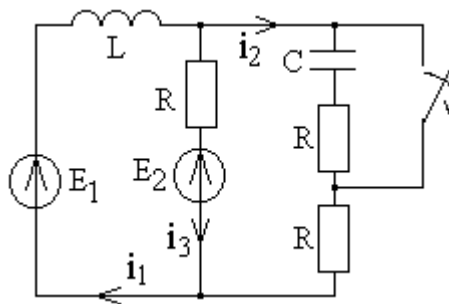
$$E_1 := 70 \text{ В} \quad E_2 := 50 \text{ В}$$

$$\psi := 210 \cdot \text{deg} \quad C^0$$

$$\omega := 100 \text{ с}^{-1}$$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

Given

$$i_{1\text{ДК}} = i_{2\text{ДК}} + i_{3\text{ДК}}$$

$$E_1 - E_2 = i_{3\text{ДК}} \cdot R$$

$$E_2 = -i_{3\text{ДК}} \cdot R + i_{2\text{ДК}} \cdot R$$

$$\begin{pmatrix} i_{1\text{ДК}} \\ i_{2\text{ДК}} \\ i_{3\text{ДК}} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{1\text{ДК}}, i_{2\text{ДК}}, i_{3\text{ДК}}) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 2.2500 \\ 1.7500 \\ .50000 \end{pmatrix}$$

$$i_{1\text{ДК}} = 2.25$$

$$i_{2\text{ДК}} = 1.75$$

$$i_{3\text{ДК}} = 0.5$$

$$u_{\text{ДК}} := 0$$

$$u_{\text{ЛДК}} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 - E_2}{R}$$

$$i'_3 := i'_1$$

$$i'_3 = 0.5$$

$$i'_2 := 0$$

$$u'_L := 0$$

$$u'_C := E_1$$

$$u'_C = 70$$

Незалежні початкові умови

$$i_{10} := i_{1\text{ДК}}$$

$$i_{10} = 2.25$$

$$u_{C0} := u_{\text{ДК}}$$

$$u_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E_1 - E_2 = u_{L0} + i_{30} \cdot R$$

$$E_2 = i_{20} \cdot 2 \cdot R - i_{30} \cdot R + u_{C0}$$

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

$$i_{30} = 1.083 \quad i_{20} = 1.167$$

$$u_{L0} = -23.333$$

Незалежні початкові умови

$$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = -186.667$$

$$du_{C0} := \frac{i_{20}}{C} \quad du_{C0} = 1.667 \times 10^4$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$$0 = di_{20} \cdot 2 \cdot R - di_{30} \cdot R + du_{C0}$$

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

$$di_{20} = -201.111 \quad di_{30} = 14.444 \quad du_{L0} = -577.778$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z(p) := \frac{R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right)}{3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}} + p \cdot L$$

$$Z(p) := \frac{R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot p \cdot L}{3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot p \cdot L \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -166.19 - 102.35 \cdot i \\ -166.19 + 102.35 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -166.19 - 102.35i \quad p_2 = -166.19 + 102.35i$$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$$\delta := |\text{Re}(p_1)| \quad \delta = 166.19 \quad \omega_0 := |\text{Im}(p_2)| \quad \omega_0 = 102.35$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

$$i''_1(t) = A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1)$$

$$i''_2(t) = B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)$$

$$i''_3(t) = C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)$$

$$u''_C(t) = D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)$$

$$u''_L(t) = F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)$$

Визначення сталих інтегрування:

Для струму $i_1(t)$:

$$i_{10} - i'_1 = A \cdot \sin(v_1)$$

$$di_{10} = -A \cdot \delta \cdot \sin(v_1) + A \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_1)$$

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \text{Find}(A, v_1) \text{ float, } 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -2.0244 & 2.0244 \\ -2.0976 & 1.0440 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$A = -2.024 \quad v_1 = -2.098$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow -2.0244 \cdot \exp(-166.19 \cdot t) \cdot \sin(102.35 \cdot t - 2.0976)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 4 \rightarrow .5000 - 2.024 \cdot \exp(-166.2 \cdot t) \cdot \sin(102.4 \cdot t - 2.098)$$

Для струму $i_2(t)$:

$$i_{20} - i'_2 = B \cdot \sin(v_2)$$

$$di_{20} = -B \cdot \delta \cdot \sin(v_2) + B \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_2)$$

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B, v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -1.1688 & 1.1688 \\ -1.5104 & 1.6312 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$B = -1.169 \quad v_2 = -1.51$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow -1.1688 \cdot \exp(-166.19 \cdot t) \cdot \sin(102.35 \cdot t - 1.5104)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -1.169 \cdot \exp(-166.2 \cdot t) \cdot \sin(102.4 \cdot t - 1.510)$$

Для струму $i_3(t)$:

$$i_{30} - i'_3 = C \cdot \sin(v_3)$$

$$di_{30} = -C \cdot \delta \cdot \sin(v_3) + C \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_3)$$

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(C, v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -1.2348 & 1.2348 \\ -2.6496 & .49203 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$C = -1.235 \quad v_3 = -2.65$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow -1.2348 \cdot \exp(-166.19 \cdot t) \cdot \sin(102.35 \cdot t - 2.6496)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 4 \rightarrow .5000 - 1.235 \cdot \exp(-166.2 \cdot t) \cdot \sin(102.4 \cdot t - 2.650)$$

Для напруги $U_C(t)$:

$$u_{C0} - u'_C = D \cdot \sin(v_C)$$

$$du_{C0} = -D \cdot \delta \cdot \sin(v_C) + D \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_C)$$

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \text{Find}(D, v_C) \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -85.548 & 85.548 \\ 2.1832 & -.95837 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$D = -85.548 \quad v_C = 2.183$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C) \text{ float}, 5 \rightarrow -85.548 \cdot \exp(-166.19 \cdot t) \cdot \sin(102.35 \cdot t + 2.1832)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 70. - 85.55 \cdot \exp(-166.2 \cdot t) \cdot \sin(102.4 \cdot t + 2.183)$$

Для напруги $U_L(t)$:

$$u_{L0} - u'_L = F \cdot \sin(v_L)$$

$$du_{L0} = -F \cdot \delta \cdot \sin(v_L) + F \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_L)$$

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \text{Find}(F, v_L) \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -49.391 & 49.391 \\ .49203 & -2.6496 \end{pmatrix}$$

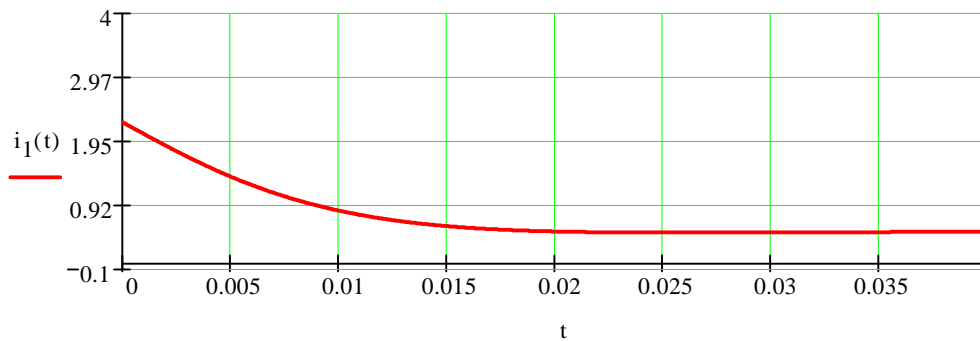
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$F = -49.391 \quad v_L = 0.492$$

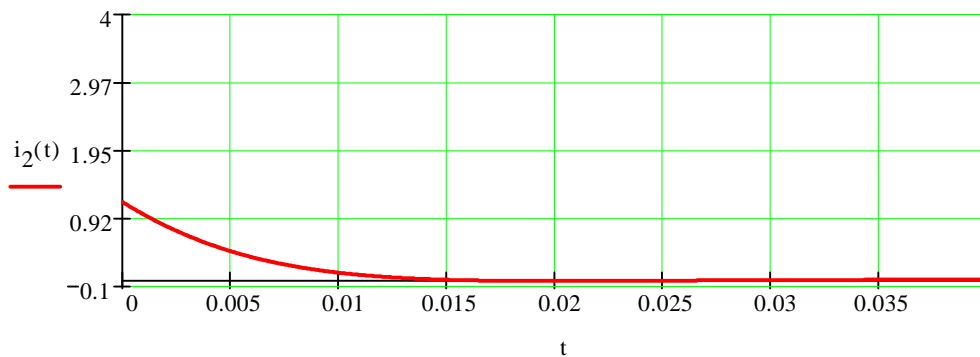
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L) \text{ float}, 5 \rightarrow -49.391 \cdot \exp(-166.19 \cdot t) \cdot \sin(102.35 \cdot t + .49203)$$

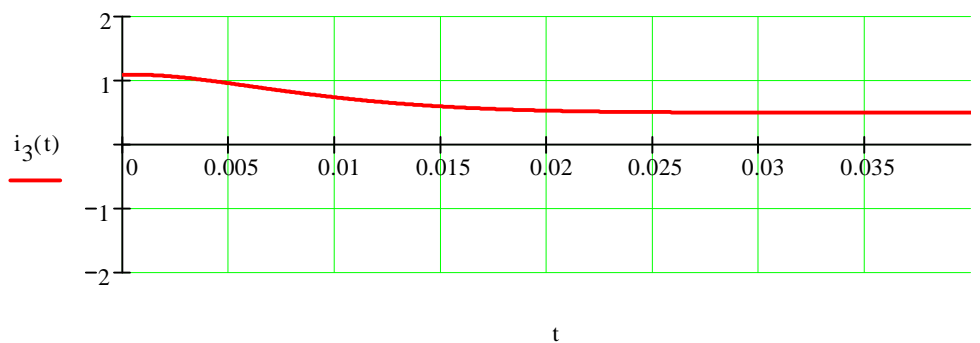
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -49.39 \cdot \exp(-166.2 \cdot t) \cdot \sin(102.4 \cdot t + .4920)$$



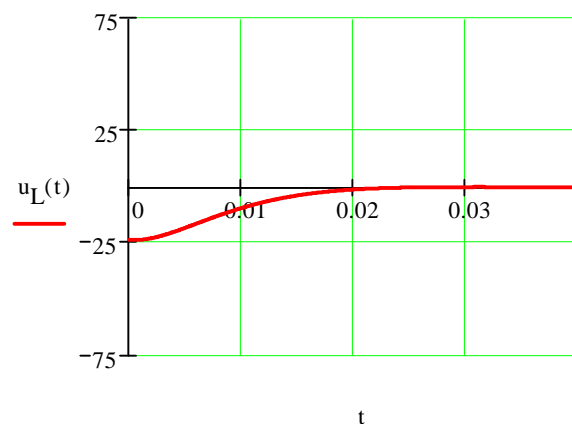
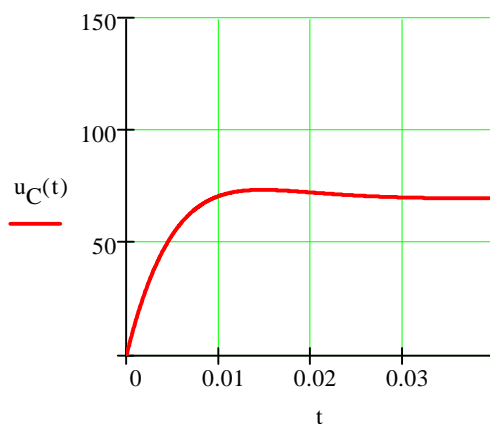
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

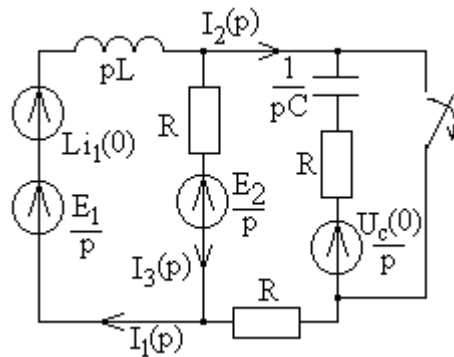


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

Given

$$i_{1\text{дк}} = i_{2\text{дк}} + i_{3\text{дк}}$$

$$E_1 - E_2 = i_{3\text{дк}} \cdot R$$

$$E_2 = -i_{3\text{дк}} \cdot R + i_{2\text{дк}} \cdot R$$

$$\begin{pmatrix} i_{1\text{дк}} \\ i_{2\text{дк}} \\ i_{3\text{дк}} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{1\text{дк}}, i_{2\text{дк}}, i_{3\text{дк}}) \text{ float}, 4 \rightarrow \begin{pmatrix} 2.250 \\ 1.750 \\ .5000 \end{pmatrix}$$

$$i_{1\text{дк}} = 2.25$$

$$i_{2\text{дк}} = 1.75$$

$$i_{3\text{дк}} = 0.5$$

$$u_{C\text{дк}} := 0$$

$$u_{L\text{дк}} := 0$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{1\text{дк}}$$

$$i_{L0} = 2.25$$

$$u_{C0} = 0$$

$$I_{k1}(p) \cdot (R + p \cdot L) - I_{k2}(p) \cdot (R) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} + L \cdot i_{L0}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot (R) + I_{k2}(p) \cdot \left(3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p}$$

$$\Delta(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L & -(R) \\ -(R) & 3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$\Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(4985.7 \cdot p + 5.7143 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^2)}{p^1}$$

$$\Delta_1(p) := \begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} + L \cdot i_{L0} & -(R) \\ \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & 3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(8417.9 \cdot p + 2.8571 \cdot 10^5 + 33.750 \cdot p^2)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -(R) & \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(2800. + 17.500 \cdot p)}{p^1}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(8417.9 \cdot p + 2.8571 \cdot 10^5 + 33.750 \cdot p^2)}{p^1 \cdot (4985.7 \cdot p + 5.7143 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^2)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(2800. + 17.500 \cdot p)}{(4985.7 \cdot p + 5.7143 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^2)^1}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float,5} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow .50000000000000000000 \cdot \frac{(112358. \cdot p + 5714200. + 325. \cdot p^2)}{p \cdot (49857. \cdot p + 5714300. + 150. \cdot p^2)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_2(p)}{p \cdot C}$$

$$u_C(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow 2.5000 \cdot 10^6 \cdot \frac{(160. + p)}{(49857. \cdot p + 5.7143 \cdot 10^6 + 150. \cdot p^2)^1 \cdot p^1}$$

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

$$u_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow -3.1250 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(1.1200 \cdot 10^5 \cdot p + 4.0000 \cdot 10^7)}{(49857. \cdot p + 5.7143 \cdot 10^6 + 150. \cdot p^2)^1}$$

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

$$N_1(p) := 8417.9 \cdot p + 2.8571 \cdot 10^5 + 33.750 \cdot p^2 \quad M_1(p) := p \cdot (4985.7 \cdot p + 5.7143 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve,p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -166.19 - 102.35 \cdot i \\ -166.19 + 102.35 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \quad p_1 = -166.19 - 102.35i \quad p_2 = -166.19 + 102.35i$$

$$N_1(p_0) = 2.857 \times 10^5 \quad N_1(p_1) = -5.347 \times 10^5 + 2.866i \times 10^5 \quad N_1(p_2) = -5.347 \times 10^5 - 2.866i \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow 9971.4 \cdot p + 5.7143 \cdot 10^5 + 45. \cdot p^2$$

$$dM_1(p_0) = 5.714 \times 10^5 \quad dM_1(p_1) = -3.143 \times 10^5 + 5.103i \times 10^5 \quad dM_1(p_2) = -3.143 \times 10^5 - 5.103i \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \text{ float,4} \rightarrow .5000 + (.8750 + .5089 \cdot i) \cdot \exp[(-166.2 - 102.4 \cdot i) \cdot t] + (.8750 - .5089 \cdot i) \cdot \exp[(-166.2 + 102.4 \cdot i) \cdot t]$$

Для напруги на конденсаторі $U_c(p)$:

$$N_u(p) := 2.5000 \cdot 10^6 \cdot (160. + p) \quad M_u(p) := p \cdot (49857. \cdot p + 5.7143 \cdot 10^6 + 150. \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve,p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -166.19 - 102.35 \cdot i \\ -166.19 + 102.35 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 0 & p_1 &= -166.19 - 102.35i & p_2 &= -166.19 + 102.35i \\
 N_u(p_0) &= 4 \times 10^8 & N_u(p_1) &= -1.547 \times 10^7 - 2.559i \times 10^8 & N_u(p_2) &= -1.547 \times 10^7 + 2.559i \times 10^8 \\
 dM_u(p) &:= \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 99714 \cdot p + 5714300 + 450 \cdot p^2 \\
 dM_u(p_0) &= 5.714 \times 10^6 & dM_u(p_1) &= -3.143 \times 10^6 + 5.103i \times 10^6 & dM_u(p_2) &= -3.143 \times 10^6 - 5.103i \times 10^6
 \end{aligned}$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

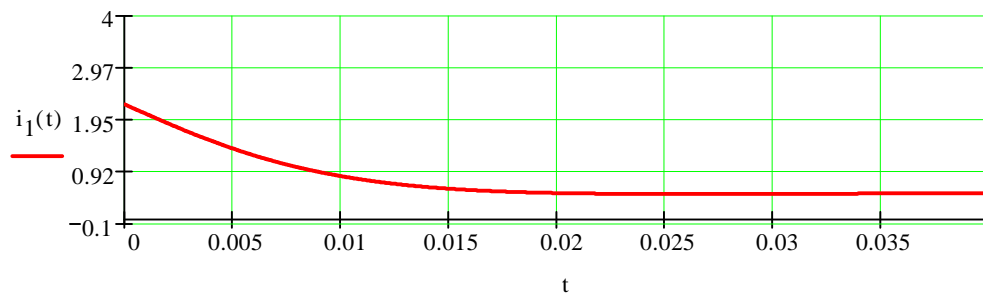
$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = -2.643 \times 10^{-3}$$

Для напруги на індуктивності:

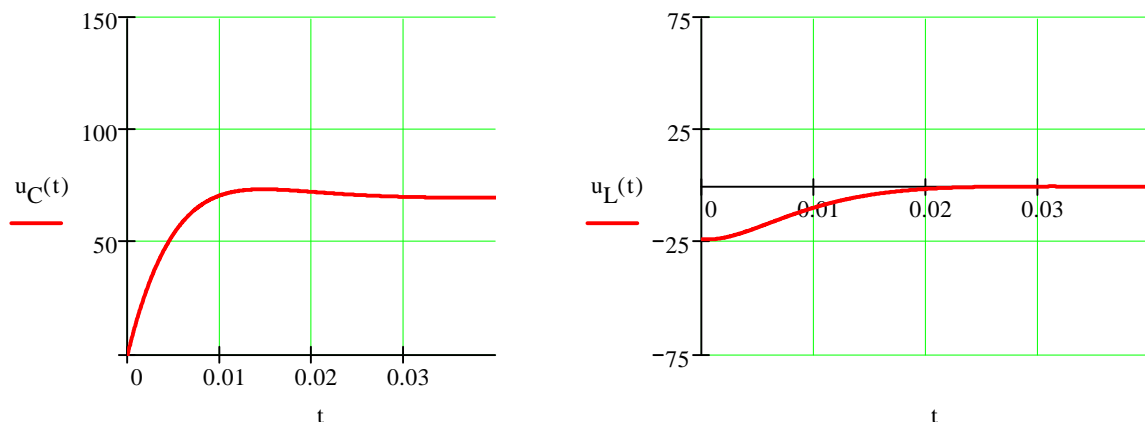
$$\begin{aligned}
 N_L(p) &:= -3.1250 \cdot 10^{-2} \cdot (1.1200 \cdot 10^5 \cdot p + 4.0000 \cdot 10^7) & M_L(p) &:= (49857 \cdot p + 5.7143 \cdot 10^6 + 150 \cdot p^2) \\
 \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} &:= M_L(p) \begin{matrix} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -166.19 - 102.35 \cdot i \\ -166.19 + 102.35 \cdot i \end{pmatrix} & p_1 &= -166.19 - 102.35i & p_2 &= -166.19 + 102.35i \\
 N_L(p_1) &= -6.683 \times 10^5 + 3.582i \times 10^5 & N_L(p_2) &= -6.683 \times 10^5 - 3.582i \times 10^5 \\
 dM_L(p) &:= \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 49857 + 300 \cdot p \\
 dM_L(p_1) &= -3.071i \times 10^4 & dM_L(p_2) &= 3.071i \times 10^4
 \end{aligned}$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = -23.333$$



Графік перехідного струму $i_L(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

$$Z_{ab}(p) := \mathbf{R'} + p \cdot L + \frac{\left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R}$$

$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R\right) \cdot (\mathbf{R'} + p \cdot L) + \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R}$$

$$(3 \cdot R \cdot L) \cdot p^2 + \left(3 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + 2 \cdot R^2\right) \cdot p + \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$$\left(3 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + 2 \cdot R^2\right)^2 - 4 \cdot (3 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0 \quad D = 0$$

$$\left(3 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + 2 \cdot R^2\right)^2 - 4 \cdot (3 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -39.958 \\ 16.386 \end{pmatrix}$$

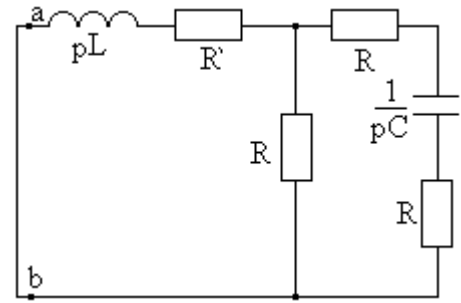


Рис.9

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:

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

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

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

$$X_C = 142.857$$

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

$$X_L = 12.5$$

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

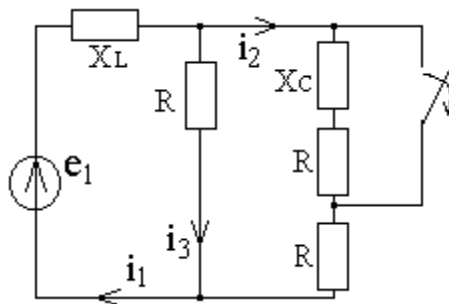
$$E_1 = -60.622 - 35i$$

$$F(E_1) = (70 \quad -150)$$

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

$$E_2 = -43.301 - 25i$$

$$F(E_2) = (50 \quad -150)$$



$$Z'_{vX} := i \cdot X_L + \frac{R \cdot R}{R + R}$$

$$Z'_{vX} = 20 + 12.5i$$

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

$$\Gamma'_{1\text{дк}} = -2.966 + 0.104i$$

$$F(\Gamma'_{1\text{дк}}) = (2.968 \quad 177.995)$$

$$\Gamma'_{2\text{дк}} := \Gamma'_{1\text{дк}} \cdot \frac{R}{R + R}$$

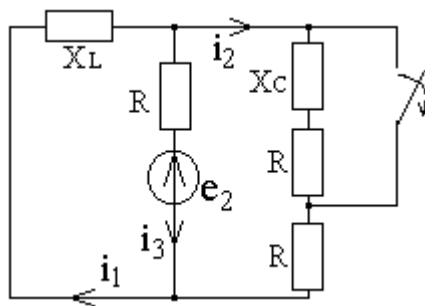
$$\Gamma'_{2\text{дк}} = -1.483 + 0.052i$$

$$F(\Gamma'_{2\text{дк}}) = (1.484 \quad 177.995)$$

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

$$\Gamma'_{3\text{дк}} = -1.483 + 0.052i$$

$$F(\Gamma'_{3\text{дк}}) = (1.484 \quad 177.995)$$



$$Z''_{\text{vX}} := R + \frac{i \cdot X_L \cdot R}{R + i \cdot X_L}$$

$$Z''_{\text{vx}} = 43.559 + 11.388i$$

$$\Gamma''_{3DK} := \frac{E_2}{Z''_{VX}}$$

$$\Gamma''_{3\text{ДК}} = -1.071 - 0.294i$$

$$F(I''_{3DK}) = (1.111 \quad -164.651)$$

$$I''_{1DK} := I''_{3DK} \cdot \frac{R}{R + i \cdot X_L}$$

$$\Gamma''_{1_{PK}} = -1.059 + 0.037i$$

$$F(I''_{1\text{ЛК}}) = (1.06 \quad 177.995)$$

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

$$\Gamma''_{\mathcal{Z}_{\text{DK}}} = -0.012 - 0.331i$$

$$F(I''_{2DK}) = (0.331 \quad -92.005)$$

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

$$I_{1\text{ ДК}} = -4.026 + 0.141i$$

$$F(I_{1\text{ ЛК}}) = (4.028 \quad 177.995)$$

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

$$I_{2DK} = -1.495 - 0.279i$$

$$F(I_{2_{JK}}) = (1.521 \quad -169.422)$$

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

$$I_{3\text{ДК}} = -0.412 + 0.346i$$

$$F(I_{3DK}) = (0.538 \quad 139.996)$$

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

$$u_{C_{DK}} = 49.412 + 58.878i$$

$$F(u_{C_{\text{ЛК}}}) = (76.865 \quad 49.996)$$

$$u_{L_{LK}} := I_{1_{LK}} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{I,DK} = -1.762 - 50.319i$$

$$F(u_{LJK}) = (50.35 \quad -92.005)$$

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

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

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

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

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

i

Початкові умови:

$$u_{\text{СЛК}}(0) = 83.266$$

$$i_{\text{ЛДК}}(0) = 0.199$$

Given

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

$$e_1(0) - e_2(0) = u_{L0} + i_{30} \cdot R$$

$$e_2(0) = i_{20} \cdot 2 \cdot R - i_{30} \cdot R + u_{C0}$$

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

$$i_{10} = 0.199$$

$$i_{20} = -0.922$$

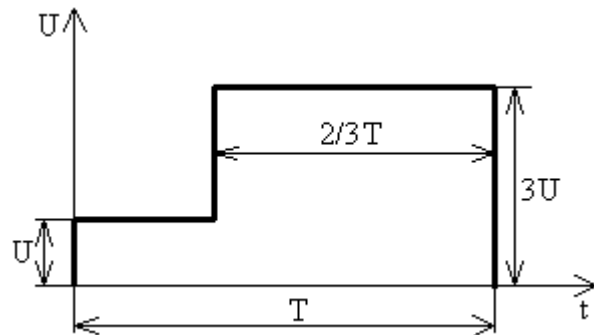
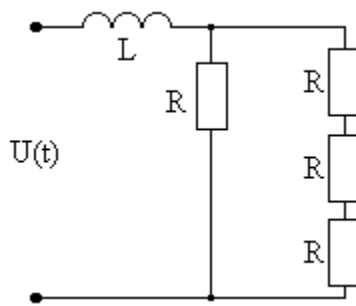
$$i_{30} = 1.121$$

$$u_{L0} = -58.998$$

$$u_{C0} = 83.266$$

Інтеграл Дюамеля

$$T := 1.5 \quad E_1 := 70 \quad E := 1$$



Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{0}{\frac{3}{4} \cdot R} \quad i_{1\text{дк}} = 0$$

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

$$u_{L\text{дк}} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\frac{3}{4} \cdot R} \quad i'_1 = 0.033$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{3R}{3R + R} \quad i'_3 = 0.025 \quad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R}{3R + R} \quad i'_2 = 8.333 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

$$i_{10} := i_{1\text{дк}} \quad i_{10} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E = i_{20} \cdot R + u_{L0}$$

$$0 = -i_{20} \cdot R + i_{30} \cdot (3 \cdot R)$$

$$\begin{pmatrix} i_{20} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{20}, i_{30}, u_{L0}) \quad i_{10} = 0 \quad i_{20} = 0 \quad i_{30} = 0 \quad u_{L0} = 1$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z_{vx}(p) := p \cdot L + \frac{R \cdot (3 \cdot R)}{3 \cdot R + R} \quad Z_{vx}(p) := \frac{p \cdot L \cdot (3 \cdot R + R) + R \cdot (3 \cdot R)}{3 \cdot R + R}$$

$$p := p \cdot L \cdot (3 \cdot R + R) + R \cdot (3 \cdot R) \quad \left. \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right\} \rightarrow -240. \quad p = -240 \quad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \quad T = 6.25 \times 10^{-3}$$

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:

$$A_1 := i_{10} - i'_1 \quad A_1 = -0.033$$

$$B_1 := i_{30} - i'_3 \quad B_1 = -0.025$$

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:

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad i_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 3.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-240. \cdot t)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \quad i_3(t) \text{ float,5} \rightarrow 2.5000 \cdot 10^{-2} - 2.5000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-240. \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 3.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-240. \cdot t)$$

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

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float,5} \rightarrow .75000 \cdot \exp(-240. \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := E_1 \quad U_0 = 70$$

$$U_1 := E_1 \quad U_1 = 70 \quad 0 < t < \frac{T}{3}$$

$$U_2 := 3E_1 \quad U_2 = 210 \quad \frac{T}{3} < t < T$$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 2.33 - 2.33 \cdot \exp(-240. \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \text{ float,3} \rightarrow 7. - 2.33 \cdot \exp(-240. \cdot t) - 4.67 \cdot \exp(-240. \cdot t + .500)$$

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

$$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -2.33 \cdot \exp(-240. \cdot t) - 4.67 \cdot \exp(-240. \cdot t + .500) + 7. \cdot \exp(-240. \cdot t + 1.50)$$

Напруга на конденсаторі на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float,5} \rightarrow 52.500 \cdot \exp(-240. \cdot t)$$

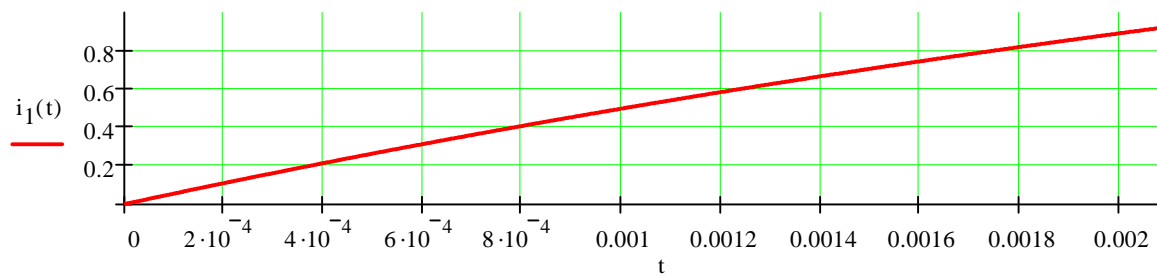
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{3}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float,5} \rightarrow 52.500 \cdot \exp(-240. \cdot t) + 105.00 \cdot \exp(-240. \cdot t + .50000)$$

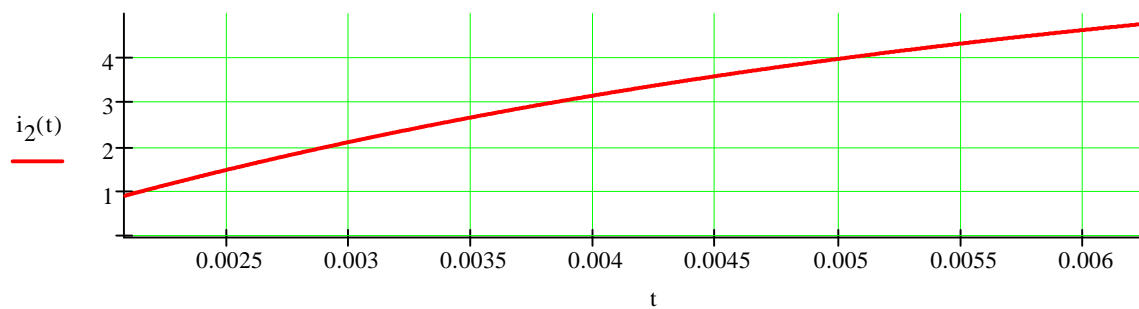
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float,5} \rightarrow 52.500 \cdot \exp(-240. \cdot t) + 105.00 \cdot \exp(-240. \cdot t + .50000) - 157.50 \cdot \exp(-240. \cdot t + 1.5000)$$

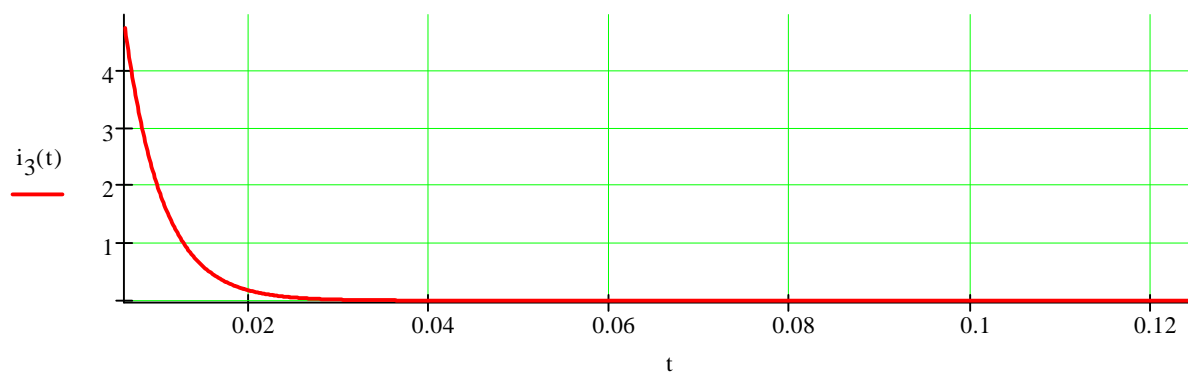
На промежутке от 0 до $1/3T$



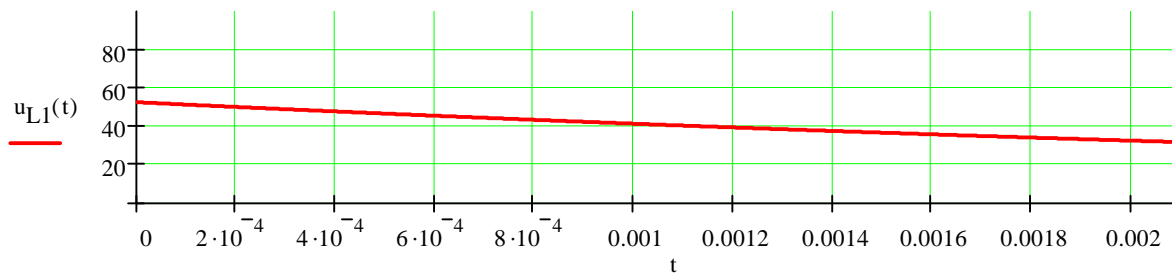
На промежутке от $1/3T$ до T



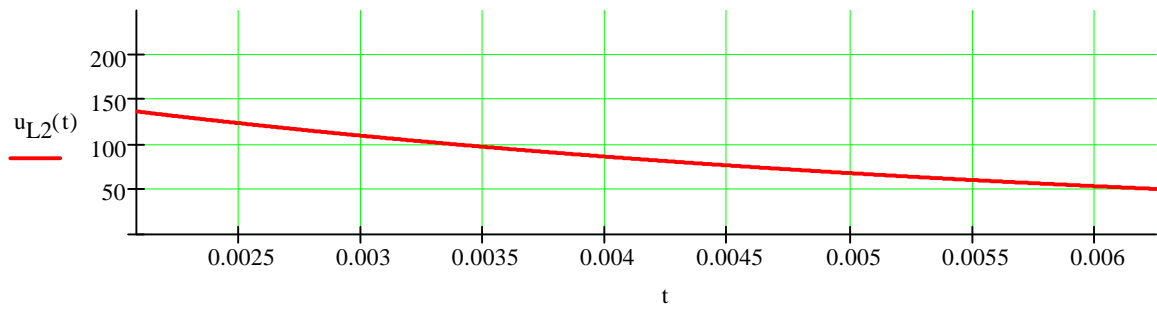
На промежутке от T до $20T$



На промежутке от 0 до $1/3T$



На промежутке от $1/3T$ до T



На промежутке от T до $20T$

