

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”
Варіант № 211

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.

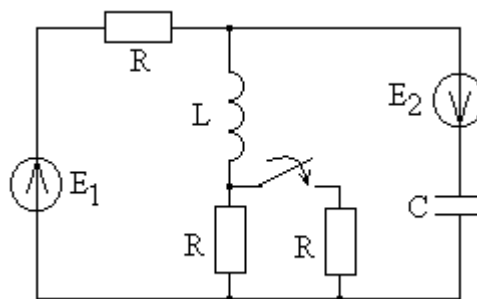
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

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.



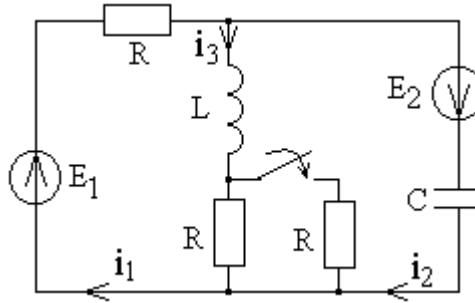
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.1$	Гн	$C := 100 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 50$	Ом		
$E_1 := 90$	В	$E_2 := 60$	В	$\psi := 45 \cdot \text{deg}$	C^0	$\omega := 200$	c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{E_1}{2 \cdot R} \quad i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \quad i_{3\text{дк}} = 0.9$$

$$i_{2\text{дк}} := 0 \quad u_{L\text{дк}} := 0$$

$$u_{C\text{дк}} := E_1 + E_2 - i_{1\text{дк}} \cdot R \quad u_{C\text{дк}} = 105$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$R' := 0.5 \cdot R$$

$$i'_1 := \frac{E_1}{R + R'} \quad i'_3 := i'_1 \quad i'_3 = 1.2$$

$$i'_2 := 0 \quad u'_L := 0$$

$$u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R \quad u'_C = 90$$

Незалежні початкові умови

$$i_{30} := i_{3\text{дк}} \quad i_{30} = 0.9$$

$$u_{C0} := u_{C\text{дк}} \quad u_{C0} = 105$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} .9000000 \\ 0 \\ 22.50000 \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = 0.9 \quad i_{20} = 0 \quad u_{L0} = 22.5$$

Незалежні початкові умови

$$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{30} = 225$$

$$du_{C0} := \frac{i_{20}}{C} \quad du_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{20} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0})$$

$$di_{10} = 0 \quad di_{20} = -1 \quad du_{L0} = 25$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R' + p \cdot L) + \left(R' + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -225. - 315.24 \cdot i \\ -225. + 315.24 \cdot i \end{pmatrix}$$

Отже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -225 - 315.24i \quad p_2 = -225 + 315.24i$$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$$\delta := |\text{Re}(p_1)| \quad \delta = 225 \quad \omega_0 := |\text{Im}(p_2)| \quad \omega_0 = 315.24$$

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 $i_1(t)$:

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \text{Find}(A, v_1) \quad \text{float, } 5 \rightarrow \begin{pmatrix} .36858 & -.36858 \\ -2.1907 & .95091 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$A = 0.369 \quad v_1 = -2.191$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \quad \text{float, } 5 \rightarrow .36858 \cdot \exp(-225.00 \cdot t) \cdot \sin(315.24 \cdot t - 2.1907)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad \text{float, } 4 \rightarrow 1.200 + .3686 \cdot \exp(-225.0 \cdot t) \cdot \sin(315.2 \cdot t - 2.191)$$

Для струму $i_2(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B, v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -3.1722 \cdot 10^{-3} & 3.1722 \cdot 10^{-3} \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$B = -3.172 \times 10^{-3} \quad v_2 = 0$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow -3.1722 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-225.00 \cdot t) \cdot \sin(315.24 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -3.172 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-225.0 \cdot t) \cdot \sin(315.2 \cdot t)$$

Для струму $i_3(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(C, v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -.58277 & .58277 \\ 2.6008 & -.54076 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$C = -0.583 \quad v_3 = 2.601$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow -.58277 \cdot \exp(-225.00 \cdot t) \cdot \sin(315.24 \cdot t + 2.6008)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 1.200 - .5828 \cdot \exp(-225.0 \cdot t) \cdot \sin(315.2 \cdot t + 2.601)$$

Для напруги $U_C(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \text{Find}(D, v_C) \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -18.429 & 18.429 \\ -2.1907 & .95091 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$D = -18.429 \quad v_C = -2.191$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C) \text{ float}, 5 \rightarrow -18.429 \cdot \exp(-225.00 \cdot t) \cdot \sin(315.24 \cdot t - 2.1907)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 90.00 - 18.43 \cdot \exp(-225.0 \cdot t) \cdot \sin(315.2 \cdot t - 2.191)$$

Для напруги $U_L(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \text{Find}(F, v_L) \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -27.689 & 27.689 \\ -2.1930 & .94858 \end{pmatrix}$$

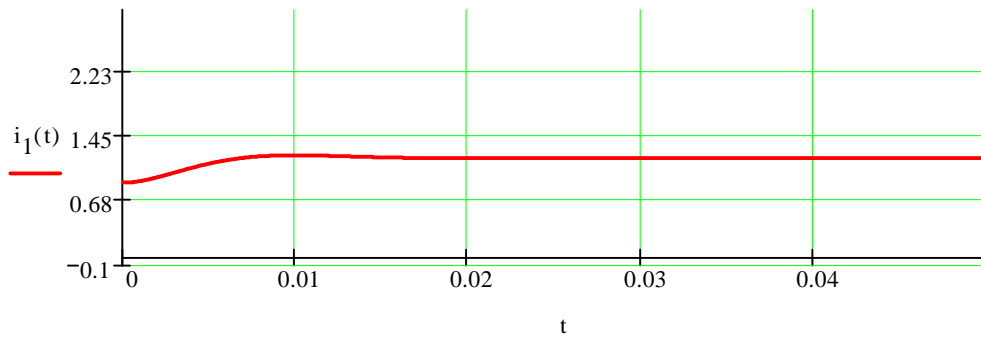
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$F = -27.689 \quad v_L = -2.193$$

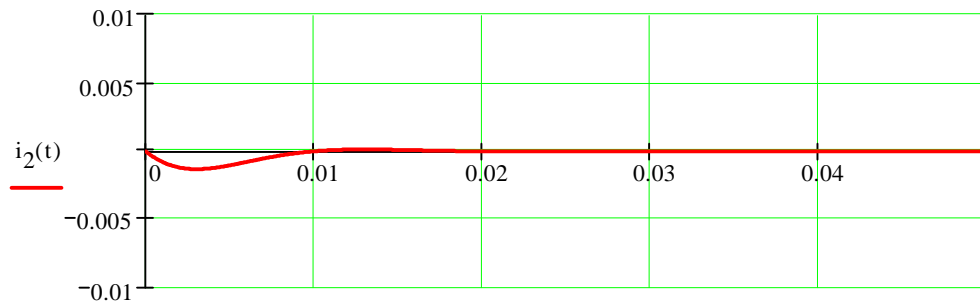
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L) \text{ float}, 5 \rightarrow -27.689 \cdot \exp(-225.00 \cdot t) \cdot \sin(315.24 \cdot t - 2.1930)$$

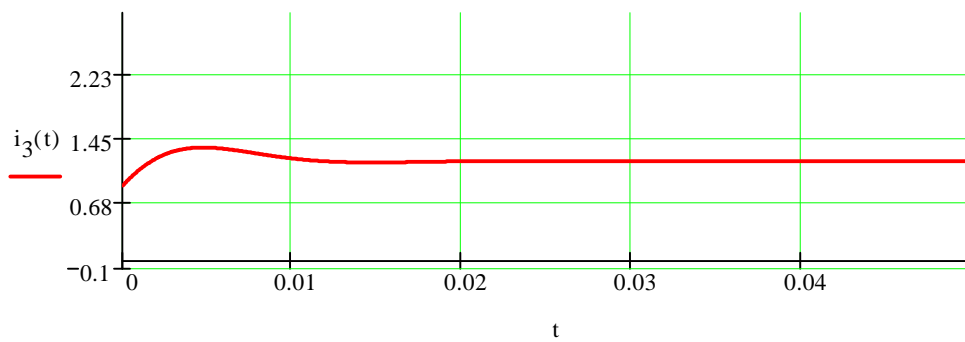
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -27.69 \cdot \exp(-225.0 \cdot t) \cdot \sin(315.2 \cdot t - 2.193)$$



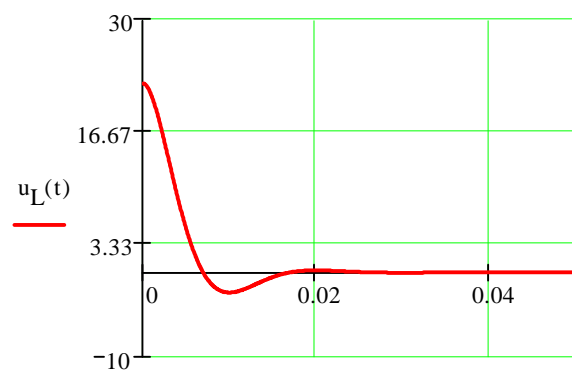
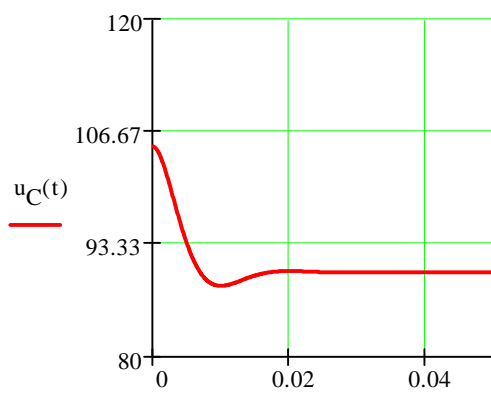
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

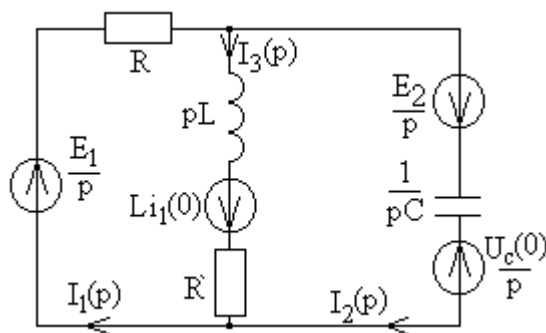


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{E_1}{2 \cdot R} \quad i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \quad i_{3\text{дк}} = 0.9$$

$$i_{2\text{дк}} := 0 \quad u_{L\text{дк}} := 0$$

$$u_{C\text{дк}} := E_1 + E_2 - i_{1\text{дк}} \cdot R \quad u_{C\text{дк}} = 105$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{3\text{дк}} \quad i_{L0} = 0.9$$

$$u_{C0} = 105$$

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

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

$$\Delta(p) := \begin{bmatrix} R + R' + p \cdot L & -(R' + p \cdot L) \\ -(R' + p \cdot L) & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R' \end{bmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(7.5000 \cdot 10^5 + 5.00 \cdot p^2 + 2250.0 \cdot p)}{p^1}$$

$$\Delta_1(p) := \begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + L \cdot i_{L0} & -(R' + p \cdot L) \\ \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R' \end{bmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(9.0000 \cdot 10^5 + 4.5000 \cdot p^2 + 2025.0 \cdot p)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{bmatrix} R + R' + p \cdot L & \frac{E_1}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -(R' + p \cdot L) & \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} \end{bmatrix} \quad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{-1125.0}{p^1}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(9.0000 \cdot 10^5 + 4.5000 \cdot p^2 + 2025.0 \cdot p)}{p^1 \cdot (7.5000 \cdot 10^5 + 5.00 \cdot p^2 + 2250.0 \cdot p)}^1.$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{-1125.0}{(7.5000 \cdot 10^5 + 5.00 \cdot p^2 + 2250.0 \cdot p)}^1.$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_2(p)}{p \cdot C} \text{ factor} \rightarrow 15 \cdot \frac{(900000 + 3150 \cdot p + 7 \cdot p^2)}{p \cdot (150000 + 450 \cdot p + p^2)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_3(p) - L \cdot i_{3\text{ДК}} \text{ factor} \rightarrow \frac{45}{2} \cdot \frac{(200 + p)}{(150000 + 450 \cdot p + p^2)}$$

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

$$N_1(p) := 9.0000 \cdot 10^5 + 4.5000 \cdot p^2 + 2025.0 \cdot p$$

$$M_1(p) := p \cdot (7.5000 \cdot 10^5 + 5.00 \cdot p^2 + 2250.0 \cdot p)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -225. - 315.24 \cdot i \\ -225. + 315.24 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -225 - 315.24i$$

$$p_2 = -225 + 315.24i$$

$$N_1(p_0) = 9 \times 10^5$$

$$N_1(p_1) = 2.25 \times 10^5$$

$$N_1(p_2) = 2.25 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 7.5000 \cdot 10^5 + 15 \cdot p^2 + 4500 \cdot p$$

$$dM_1(p_0) = 7.5 \times 10^5$$

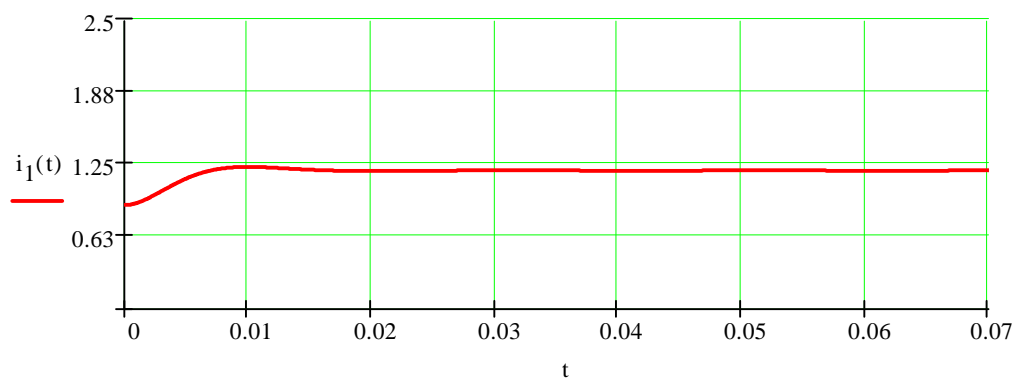
$$dM_1(p_1) = -9.938 \times 10^5 + 7.093i \times 10^5$$

$$dM_1(p_2) = -9.938 \times 10^5 - 7.093i \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) = \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad i_1(0) = 0.9$$

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 1.200 + .3686 \cdot \exp(-225.0 \cdot t) \cdot \sin(315.2 \cdot t - 2.191)$$



Графік перехідного струму $i_1(t)$.

Для напруги на конденсаторі $U_C(p)$:

$$N_u(p) := 15 \cdot (900000 + 3150 \cdot p + 7 \cdot p^2)$$

$$M_u(p) := p \cdot (150000 + 450 \cdot p + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -225. + 315.25 \cdot i \\ -225. - 315.25 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -225 + 315.25i$$

$$p_2 = -225 - 315.25i$$

$$N_u(p_0) = 1.35 \times 10^7$$

$$N_u(p_1) = -2.251 \times 10^6$$

$$N_u(p_2) = -2.251 \times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 150000 + 900 \cdot p + 3 \cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 1.5 \times 10^5$$

$$dM_u(p_1) = -1.988 \times 10^5 - 1.419i \times 10^5$$

$$dM_u(p_2) = -1.988 \times 10^5 + 1.419i \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 105.004$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float, } 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 90. + 15.0044 \cdot \exp(-225 \cdot t) \cdot \cos(315.25 \cdot t) + 10.7084 \cdot \exp(-225 \cdot t) \cdot \sin(315.25 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{45}{2} (200 + p)$$

$$M_L(p) := (150000 + 450 \cdot p + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -225. + 315.25 \cdot i \\ -225. - 315.25 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -225 + 315.25i$$

$$p_2 = -225 - 315.25i$$

$$N_L(p_1) = -562.5 + 7.093i \times 10^3$$

$$N_L(p_2) = -562.5 - 7.093i \times 10^3$$

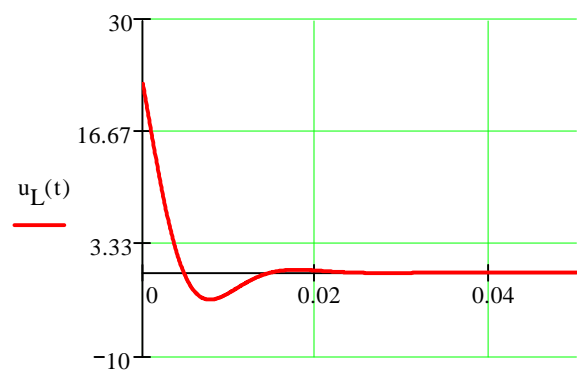
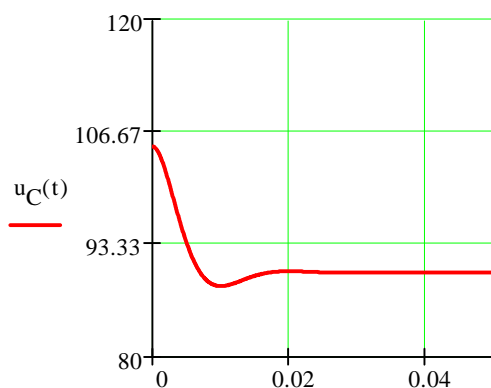
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 450 + 2 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 630.5i$$

$$dM_L(p_2) = -630.5i$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 22.5$$



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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

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

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

$$D = 0$$

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

$$R' := \left(R'' \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R'' \cdot L) \cdot \left(\frac{R''}{C} + \frac{R'}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R''} \rightarrow \begin{pmatrix} -26.147 \\ 11.332 \end{pmatrix}$$

$$R'_{1,0} = 11.332$$

Отже при такому значенні активного опору у вітці з джерелом напруги Е1 аперіодичний процес перейде в коливальний.

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

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

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

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

$$X_C = 50$$

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

$$X_L = 20$$

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

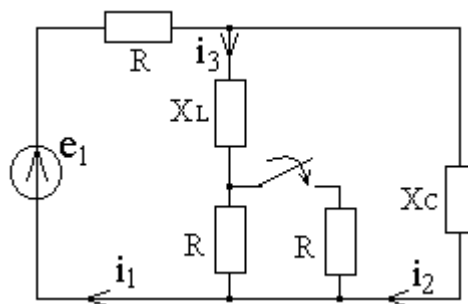
$$E_1 = 63.64 + 63.64i$$

$$F(E_1) = (90 \quad 45)$$

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

$$E_2 = 42.426 + 42.426i$$

$$F(E_2) = (60 \quad 45)$$



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

$$Z_{vx} = 13.235 + 27.941i$$

$$I_{1дк} := \frac{E_1}{Z_{vx}}$$

$$I_{1дк} = 2.741 - 0.979i$$

$$F(I_{1дк}) = (2.911 \quad -19.654)$$

$$I_{2дк} := I_{1дк} \cdot \frac{R + X_L \cdot i}{R + X_L \cdot i - i \cdot X_C}$$

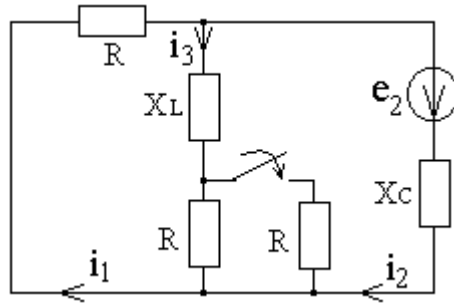
$$I_{2дк} = 2.252 + 1.469i$$

$$F(I_{2дк}) = (2.688 \quad 33.111)$$

$$I_{3дк} := I_{1дк} - I_{2дк}$$

$$I_{3дк} = 0.49 - 2.448i$$

$$F(I_{3дк}) = (2.496 \quad -78.69)$$



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

$$Z''_{vx} = 25.962 - 45.192i$$

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

$$\Gamma''_{2dk} = -0.3 + 1.111i$$

$$F(\Gamma''_{2dk}) = (1.151 \quad 105.124)$$

$$\Gamma''_{1dk} := \Gamma''_{2dk} \cdot \frac{R + X_L \cdot i}{R + i \cdot X_L + R}$$

$$\Gamma''_{1dk} = -0.263 + 0.548i$$

$$F(\Gamma''_{1dk}) = (0.608 \quad 115.615)$$

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

$$\Gamma''_{3dk} = -0.038 + 0.563i$$

$$F(\Gamma''_{3dk}) = (0.564 \quad 93.814)$$

$$I_{1dk} := \Gamma''_{1dk} + \Gamma''_{1dk}$$

$$I_{1dk} = 2.479 - 0.431i$$

$$F(I_{1dk}) = (2.516 \quad -9.862)$$

$$I_{2dk} := \Gamma''_{2dk} + \Gamma''_{2dk}$$

$$I_{2dk} = 1.951 + 2.58i$$

$$F(I_{2dk}) = (3.235 \quad 52.896)$$

$$I_{3dk} := \Gamma''_{3dk} - \Gamma''_{3dk}$$

$$I_{3dk} = 0.527 - 3.011i$$

$$F(I_{3dk}) = (3.057 \quad -80.07)$$

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

$$u_{Cdk} = -150.543 - 26.354i$$

$$F(u_{Cdk}) = (152.832 \quad -170.07)$$

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

$$u_{Ldk} = 60.217 + 10.542i$$

$$F(u_{Ldk}) = (61.133 \quad 9.93)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = -37.27$$

$$i_{Ldk}(0) = -4.258$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 3.745$$

$$i_{20} = 8.003$$

$$i_{30} = -4.258$$

$$u_{L0} = 115.63$$

$$u_{C0} = -37.27$$

Інтеграл Дюамеля

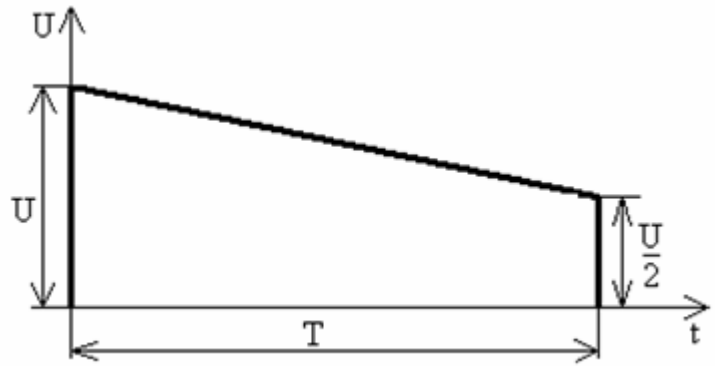
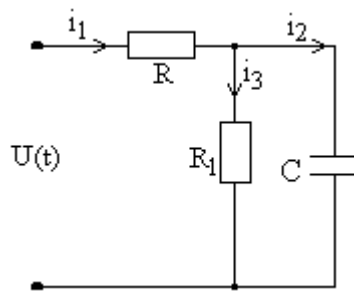
$$T := 0.9$$

$$E_1 := 90$$

$$E := 1$$

$$R_1 := \frac{R \cdot R}{R + R}$$

$$R_1 = 25$$



Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{0}{R_1 + R}$$

$$i_{1\text{ДК}} = 0$$

$$i_{3\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}}$$

$$i_{3\text{ДК}} = 0$$

$$i_{2\text{ДК}} := 0$$

$$i_{2\text{ДК}} = 0$$

$$u_{\text{CDK}} := 0 - i_{1\text{ДК}} \cdot R$$

$$u_{\text{CDK}} = 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{R_1 + R}$$

$$i'_1 = 0.013$$

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

$$i'_3 = 0.013$$

$$i'_2 := 0$$

$$i'_2 = 0$$

$$u'_C := E - i'_1 \cdot R$$

$$u'_C = 0.333$$

Незалежні початкові умови

$$u_{C0} := u_{\text{CDK}}$$

$$u_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E = i_{30} \cdot R_1 + i_{10} \cdot R$$

$$0 = u_{C0} - i_{30} \cdot R_1$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ i_{30} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, i_{30})$$

$$i_{10} = 0.02$$

$$i_{20} = 0.02$$

$$i_{30} = 0$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z_{\text{vx}}(p) := R + \frac{R_1 \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R_1 + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$Z_{\text{vx}}(p) := \frac{R \cdot \left(R_1 + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R_1 \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R_1 + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$p := R \cdot \left(R_1 + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R_1 \cdot \frac{1}{p \cdot C} \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow -600.$$

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

$$T = 1.5 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -600$$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$$A_1 := i_{10} - i'_1 \quad A_1 = 6.667 \times 10^{-3}$$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 - i''_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-600 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := A_1 \cdot R - A_1 \cdot R \cdot e^{p \cdot t} \text{ float,5} \rightarrow .33333 - .33333 \cdot \exp(-600 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := E_1 \quad U_0 = 90$$

$$U_1(t) := U_0 - \frac{E_1}{2T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 90. - 30000 \cdot t \quad 0 < t < T$$

$$U_2 := 0 \quad U_2 = 0 \quad T < t < \infty$$

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow -30000.$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,2} \end{array} \right. \rightarrow 1.5 - .93 \cdot \exp(-6.0 \cdot 10^2 \cdot t) - 4.0 \cdot 10^2 \cdot t$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau + \left(U_2 - \frac{E_1}{2} \right) \cdot g_{11}(t - T)$$

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 1.00 \cdot 10^{-20} - .933 \cdot \exp(-600 \cdot t) + .633 \cdot \exp(-600 \cdot t + .900)$$

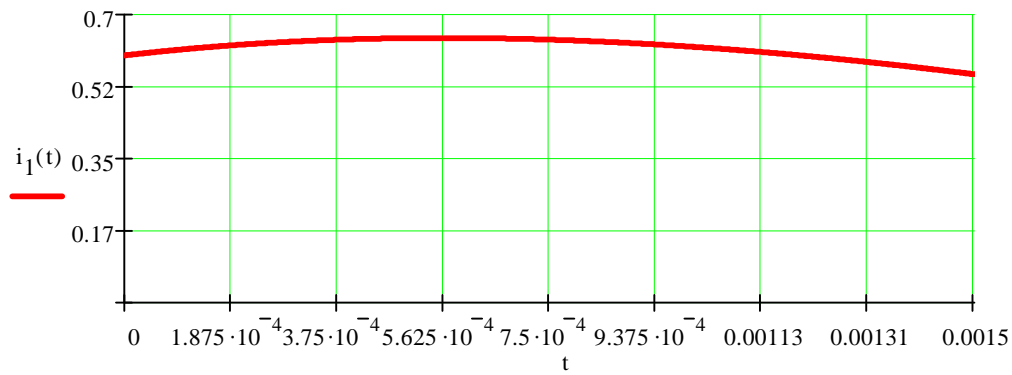
Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,5} \rightarrow 46.666 - 46.666 \cdot \exp(-600 \cdot t) - 9999.9 \cdot t$$

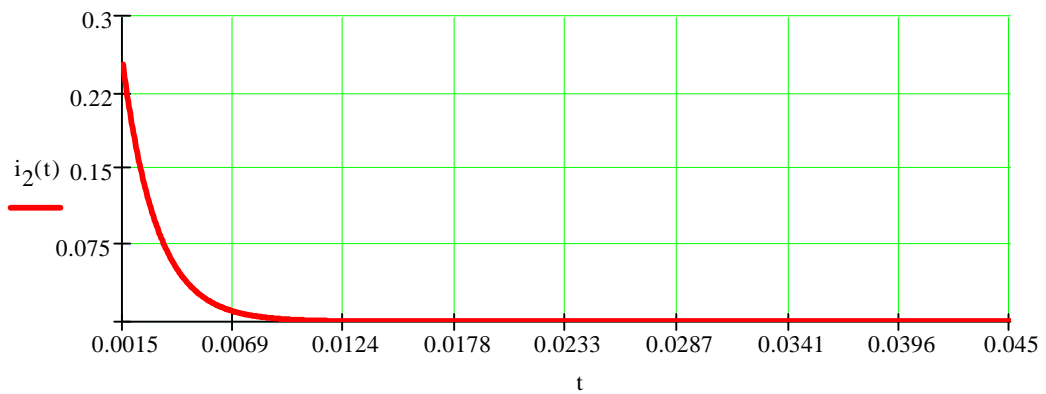
$$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau + \left(U_2 - \frac{E_1}{2} \right) \cdot h_{cU}(t - T)$$

$$u_{C2}(t) \text{ float,3} \rightarrow -46.7 \cdot \exp(-600 \cdot t) + 31.7 \cdot \exp(-600 \cdot t + .900)$$

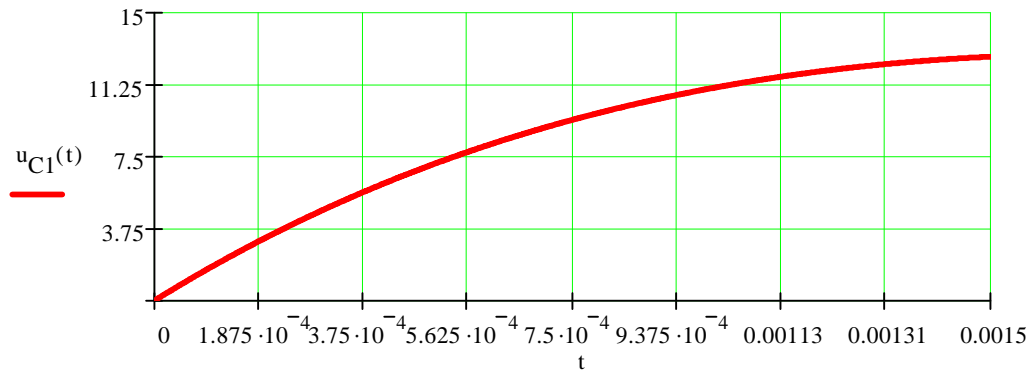
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \leq t \leq T$



Графік вхідного струму на проміжку: $T \leq t \leq \infty$



Графік наруги на реактивному елементі на проміжку: $0 \leq t \leq T$



Графік наруги на реактивному елементі на проміжку: $T \leq t \leq \infty$

