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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 308

Виконав: ________________
____
____
____

Перевірив: _______________

Київ 2007

Умова задання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

1) класичним методом розрахзувати напруги на реактивних елементах та струми перехідного процесу;

2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС Е1 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 Е1, 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 Е1і Е2 в колі діють синусоїдні джерела.

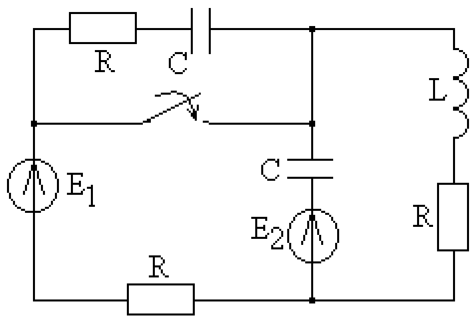
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

а) виключити катушку індуктивності чи ємність, замінивши останню опором R;

б) вважаючи, що замість ждерела постійної ЕДС Е1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивному елементі методом інтеграла Дюамеля при періоді Т, заданому в долях від τ;

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



Основна схема

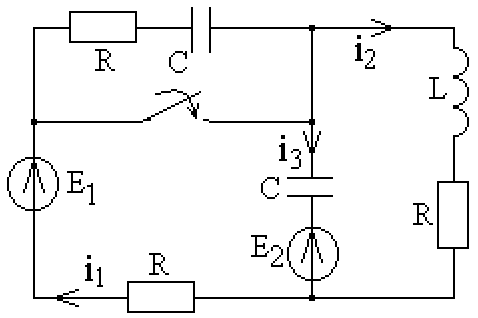
Вхідні данні:

$L := 0.1$ Гн $\quad C := 200 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 50$ Ом

$E_1 := 100$ В $\quad E_2 := 80$ В $\quad \psi := 30 \cdot deg$ C^0 $\quad \omega := 100$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $\quad$ $i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad$ $i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2$ $\quad$ $u_{Cдк} = -80$ $\quad$ $u_{Lдк} := 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad$ $i'_2 := i'_1$ $\quad$ $i'_2 = 1$

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

$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad$ $u'_C = -30$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad$ $i_{20} = 0$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad$ $u_{C0} = -80$

Залежні початкові умови

Given

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

$E_1 - E_2 = u_{C0} + i_{10} \cdot R$

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \ \rightarrow \begin{pmatrix} 2. \\ 2. \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 2$ $\quad$ $i_{30} = 2$ $\quad$ $u_{L0} = 0$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\quad$ $di_{20} = 0$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\quad$ $du_{C0} = 1 \times 10^4$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(di_{10}, di_{30}, du_{L0}\right)$$

$di_{10} = -200$ $\quad di_{30} = -200$ $\quad du_{L0} = 1 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $\quad t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -300. - 100.00 \cdot i \\ -300. + 100.00 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -300 - 100i$ $\quad p_2 = -300 + 100i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := \left|\mathrm{Re}\left(p_1\right)\right|$ $\quad \delta = 300$ $\quad \omega_0 := \left|\mathrm{Im}\left(p_2\right)\right|$ $\quad \omega_0 = 100$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

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

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

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

Визначення сталих інтегрування:

Для струму i1(t):

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(A, v_1\right) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -1.4142 & 1.4142 \\ -2.3562 & .78540 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -1.414$ $\quad v_1 = -2.356$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_1\right) \text{ float}, 5 \rightarrow -1.4142 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - 2.3562)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 1. - 1.414 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - 2.356)$$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} 3.1623 & -3.1623 \\ -2.8198 & .32175 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = 3.162 \qquad v_2 = -2.82$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 3.1623\cdot\exp(-300.00\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t - 2.8198)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 1. + 3.162\cdot\exp(-300.0\cdot t)\cdot\sin(100.0\cdot t - 2.820)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -4.4721 & 4.4721 \\ -2.6779 & .46365 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -4.472 \qquad v_3 = -2.678$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -4.4721\cdot\exp(-300.00\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t - 2.6779)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -4.472\cdot\exp(-300.0\cdot t)\cdot\sin(100.0\cdot t - 2.678)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -70.711 & 70.711 \\ .78540 & -2.3562 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -70.711 \qquad v_C = 0.785$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -70.711\cdot\exp(-300.00\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t + .78540)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -30. - 70.71\cdot\exp(-300.0\cdot t)\cdot\sin(100.0\cdot t + .7854)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 100. & -100. \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

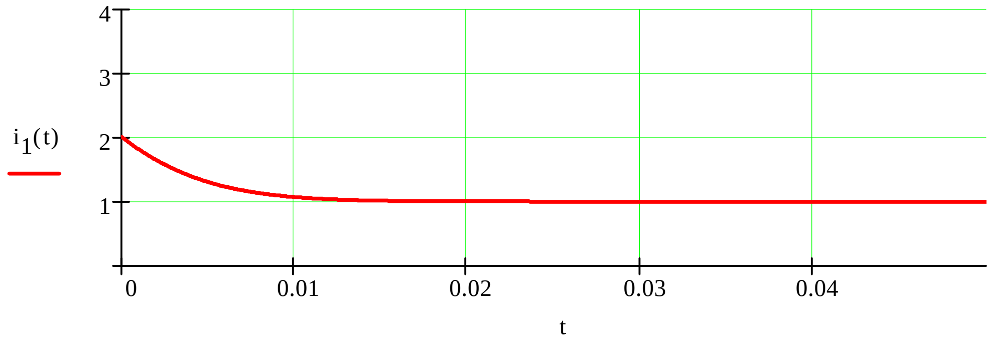
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = 100 \qquad v_L = 0$

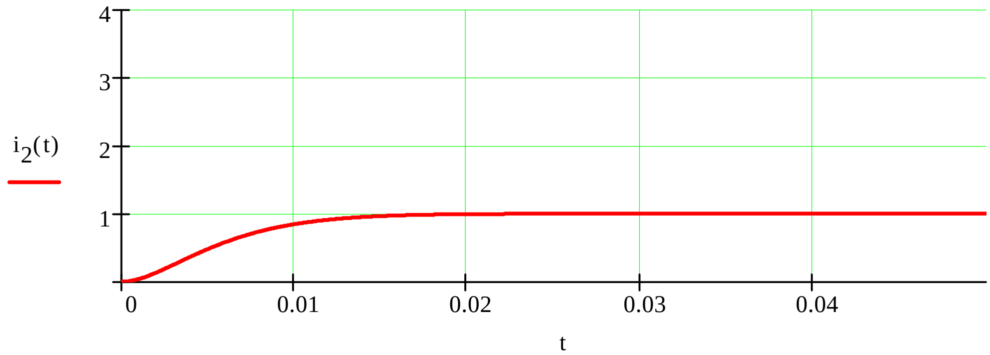
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 100.\cdot\exp(-300.00\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t)$

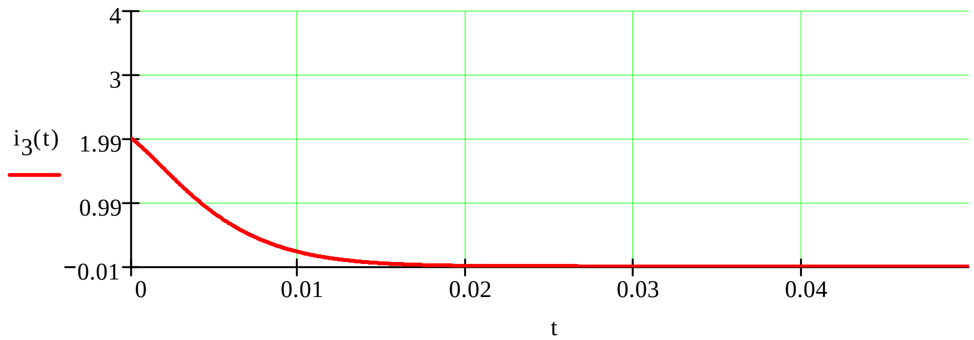
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 100.\cdot\exp(-300.0\cdot t)\cdot\sin(100.0\cdot t)$



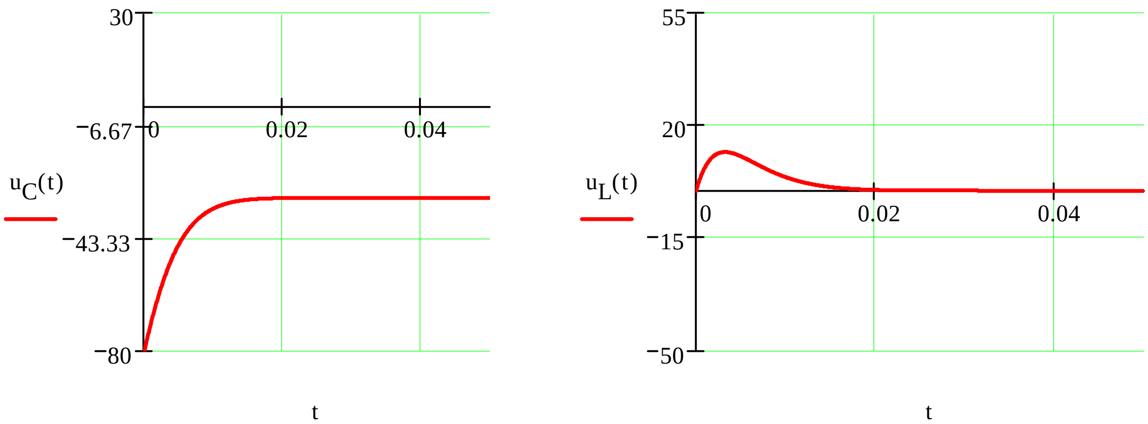
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

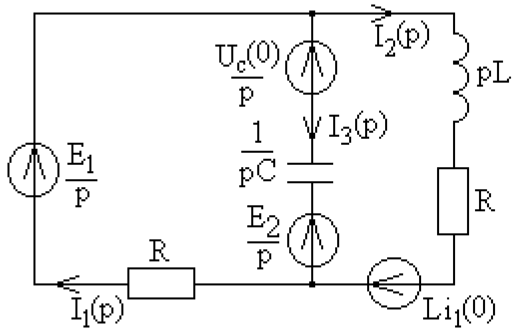


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2 \quad u_{Cдк} = -80 \quad u_{Lдк} := -u_{Cдк} + E_2 \quad u_{Lдк} = 160$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \quad i_{L0} = 0$

$u_{C0} = -80$

$$I_{k1}(p)\cdot\left(R + \frac{1}{p\cdot C}\right) - I_{k2}(p)\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p}$$

$$-I_{k1}(p)\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) + I_{k2}(p)\cdot\left(p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C}\right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20}$$

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}}\cdot\left(5.0\cdot p^{2.} + 3000.0\cdot p + 5.0000\cdot 10^{5}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{100.}{p^{1.}}\cdot\left(.1\cdot p + 50. + \frac{5000.}{p^{1.}}\right)$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{5.0000\cdot 10^{5}}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \,\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 2.\cdot\frac{\left(p^2 + 500.\cdot p + 50000.\right)}{p\cdot\left(600.\cdot p + 100000. + p^2\right)}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{5.0000\cdot 10^5}{p^{1.}\cdot\left(5.0\cdot p^{2.} + 3000.0\cdot p + 5.0000\cdot 10^5\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \,\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 2.\cdot\frac{(p + 500.)}{\left(600.\cdot p + 100000. + p^2\right)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor } \rightarrow -80\cdot(375 + p)\cdot\frac{(p + 100)}{\left(600\cdot p + 100000 + p^2\right)\cdot p}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2\text{дк}}$$

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{10000}{\left(600\cdot p + 100000 + p^2\right)}$$

Перейдемо тепер від зображення до функції часу за формулою розкладу:
Для струму I1(p):

$$N_1(p) := 2\cdot\left(p^2 + 500.\cdot p + 50000.\right) \qquad M_1(p) := p\cdot\left(600.\cdot p + 100000. + p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p) \,\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -300. - 100.00\cdot i\\ -300. + 100.00\cdot i\end{pmatrix} \quad p_0 = 0 \qquad p_1 = -300 - 100i \qquad p_2 = -300 + 100i$$

$$N_1(p_0) = 1\times 10^5 \qquad N_1(p_1) = -4\times 10^4 + 2i\times 10^4 \qquad N_1(p_2) = -4\times 10^4 - 2i\times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p) \,\Big|\begin{matrix}\text{factor}\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow 1200.\cdot p + 1.0000\cdot 10^5 + 3.\cdot p^{2.}$$

$$dM_1(p_0) = 1\times 10^5 \qquad dM_1(p_1) = -2\times 10^4 + 6i\times 10^4 \qquad dM_1(p_2) = -2\times 10^4 - 6i\times 10^4$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \,\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 1.0000 + 1.00000\cdot\exp(-300.\cdot t)\cdot\cos(100.00\cdot t) + 1.00000\cdot\exp(-300.\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := -80\cdot(375 + p)\cdot(p + 100) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(600\cdot p + 100000 + p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_u(p) \,\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -300. + 100.00\cdot i\\ -300. - 100.00\cdot i\end{pmatrix} \quad p_0 = 0 \qquad p_1 = -300 + 100i \qquad p_2 = -300 - 100i$$

$$N_u(p_0) = -3\times 10^6 \qquad N_u(p_1) = 2\times 10^6 + i\times 10^6 \qquad N_u(p_2) = 2\times 10^6 - i\times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp}M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 1200\cdot p + 100000 + 3\cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 1\times 10^5$ $\quad$ $dM_u(p_1) = -2\times 10^4 - 6i\times 10^4$ $\quad$ $dM_u(p_2) = -2\times 10^4 + 6i\times 10^4$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = -80$$

$$u_C(t) \left|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow -30. - 50.000\cdot\exp(-300.\cdot t)\cdot\cos(100.00\cdot t) - 50.000\cdot\exp(-300.\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := 10000$ $\qquad$ $M_L(p) := 600\cdot p + 100000 + p^2$

$$\begin{pmatrix}p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_L(p) \left|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix}-300. + 100.00\cdot i\\ -300. - 100.00\cdot i\end{pmatrix} \qquad p_1 = -300 + 100i \qquad p_2 = -300 - 100i$$

$N_L(p_1) = 1\times 10^4$ $\qquad$ $N_L(p_2) = 1\times 10^4$

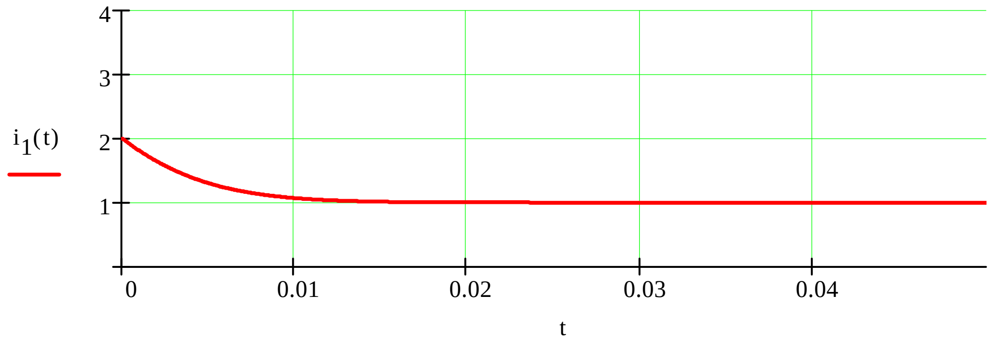
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 600 + 2\cdot p$$

$dM_L(p_1) = 200i$ $\qquad$ $dM_L(p_2) = -200i$

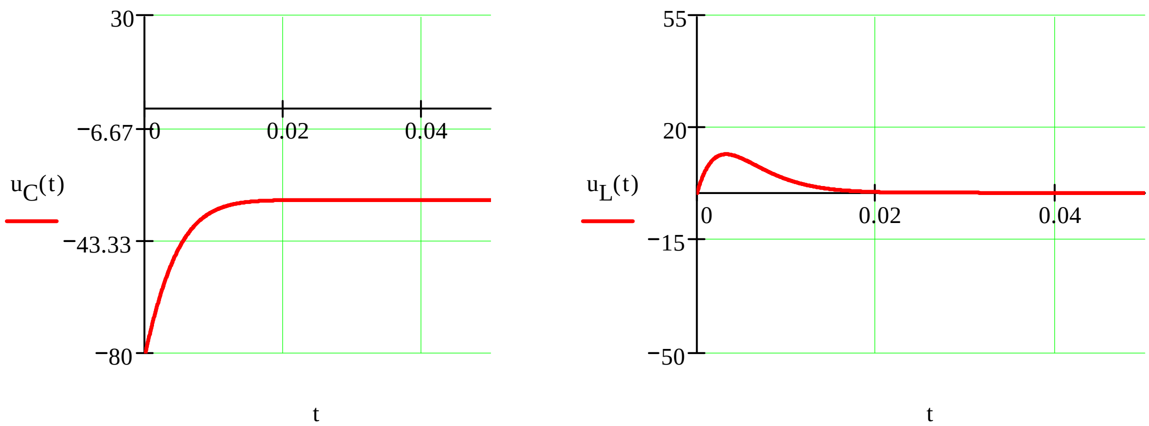
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

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

$$u_L(t) \left|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix}\right. \rightarrow 100.000\cdot\exp(-300.\cdot t)\cdot\sin(100.00\cdot t)$$



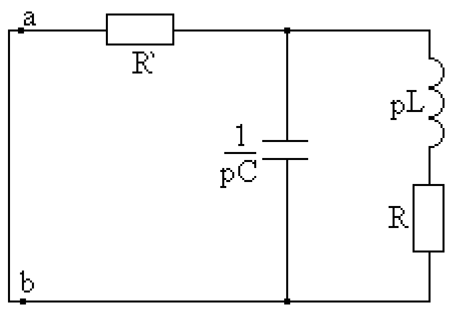
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$D = 0$

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R'\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 5.2786 \\ 94.721 \end{pmatrix}$$

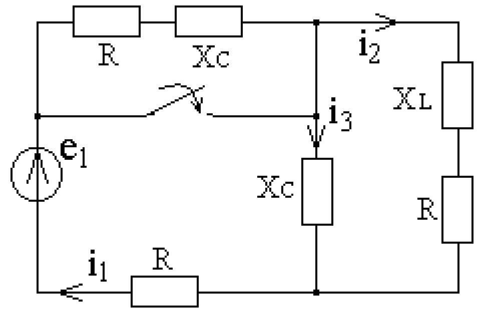
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

$e_1(t) := \sqrt{2}\cdot E_1\cdot\sin(\omega\cdot t + \psi)$ $\quad$ $e_2(t) := \sqrt{2}\cdot E_2\cdot\sin(\omega\cdot t + \psi)$

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $\quad$ $X_C = 50$ $\quad$ $X_L := \omega\cdot L$ $\quad$ $X_L = 10$

$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\quad$ $E_1 = 86.603 + 50i$ $\quad$ $F(E_1) = (100\ \ 30)$

$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\quad$ $E_2 = 69.282 + 40i$ $\quad$ $F(E_2) = (80\ \ 30)$

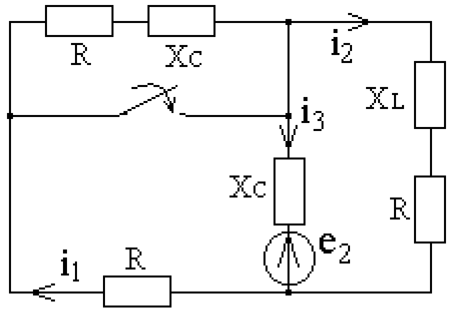


$Z'_{vx} := 2\cdot R - i\cdot X_C + \frac{(R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\quad$ $Z'_{vx} = 130.488 - 75.61i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\quad$ $I'_{1дк} = 0.331 + 0.575i$ $\quad$ $F(I'_{1дк}) = (0.663\ \ 60.09)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\quad$ $I'_{2дк} = 0.512 + 0.079i$ $\quad$ $F(I'_{2дк}) = (0.518\ \ 8.749)$

$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$ $\quad$ $I'_{3дк} = -0.181 + 0.496i$ $\quad$ $F(I'_{3дк}) = (0.528\ \ 110.059)$



$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (2 \cdot R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C}$ $\qquad Z''_{vx} = 36.722 - 50.207i$

$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\qquad I''_{3дк} = 0.138 + 1.279i$ $\qquad F(I''_{3дк}) = (1.286 \;\; 83.818)$

$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{(R + i \cdot X_L)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C}$ $\qquad I''_{1дк} = -0.145 + 0.397i$ $\qquad F(I''_{1дк}) = (0.422 \;\; 110.059)$

$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк}$ $\qquad I''_{2дк} = 0.283 + 0.882i$ $\qquad F(I''_{2дк}) = (0.926 \;\; 72.184)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = 0.186 + 0.972i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (0.989 \;\; 79.176)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = 0.795 + 0.961i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (1.247 \;\; 50.383)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad I_{3дк} = -0.32 - 0.783i$ $\qquad F(I_{3дк}) = (0.845 \;\; -112.214)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\qquad u_{Cдк} = -39.131 + 15.98i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (42.268 \;\; 157.786)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -9.716 + 1.858i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (9.892 \;\; 169.176)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 22.6$

$i_{20} = 1.358$

Given

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

$e_1(0) - e_2(0) = u_{C0} + i_{10} \cdot R$

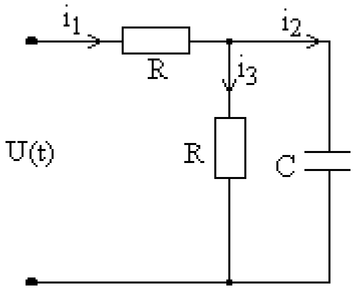
$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$

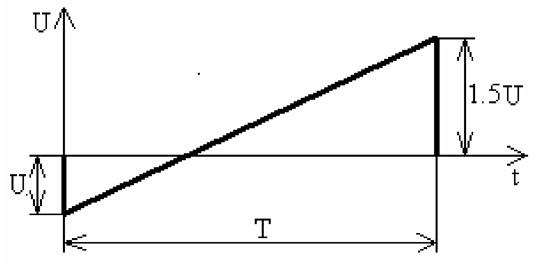
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$$

$i_{10} = -0.169$ $\qquad i_{20} = 1.358$ $\qquad i_{30} = -1.528$ $\qquad u_{L0} = 11.245$ $\qquad u_{C0} = 22.6$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.0$ $\quad E_1 := 100$ $\quad E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{0}{R+R}$ $\quad i_{1дк} = 0$

$i_{3дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{3дк} = 0$ $\quad i_{2дк} := 0$ $\quad i_{2дк} = 0$

$u_{Cдк} := 0 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R+R}$ $\quad i'_1 = 0.01$

$i'_3 := i'_1$ $\quad i'_3 = 0.01$ $\quad i'_2 := 0$ $\quad i'_2 = 0$

$u'_C := E - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 0.5$

Незалежні початкові умови

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$i_{10} = 0.02$ $\quad i_{20} = 0.02$ $\quad i_{30} = 0$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \ \Big|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -200. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 5 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -200$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1$ $\qquad A_1 = 0.01$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \; \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 1.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-200. \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float}, 5 \; \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-200. \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := -E_1$ $\qquad U_0 = -100$

$U_1(t) := U_0 + \frac{2.5E_1}{T} \cdot t$ $\qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \; \rightarrow -100. + 50000. \cdot t$ $\qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \; \rightarrow 50000.$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) \, d\tau \qquad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 1.50 - 3.50 \cdot \exp(-200. \cdot t) + 500. \cdot t$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) \, d\tau + \left(U_2 - 1.5E_1\right) \cdot g_{11}(t - T)$$

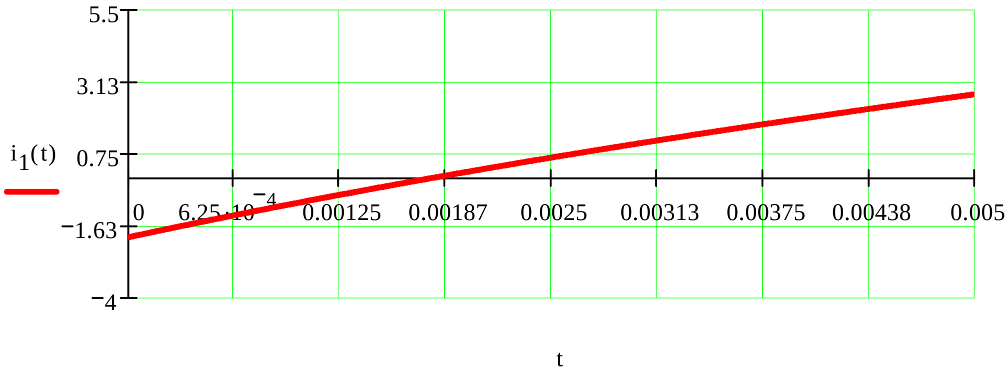
$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -3.50 \cdot \exp(-200. \cdot t) + \exp(-200. \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивністі на цих проміжках буде мати вигляд:

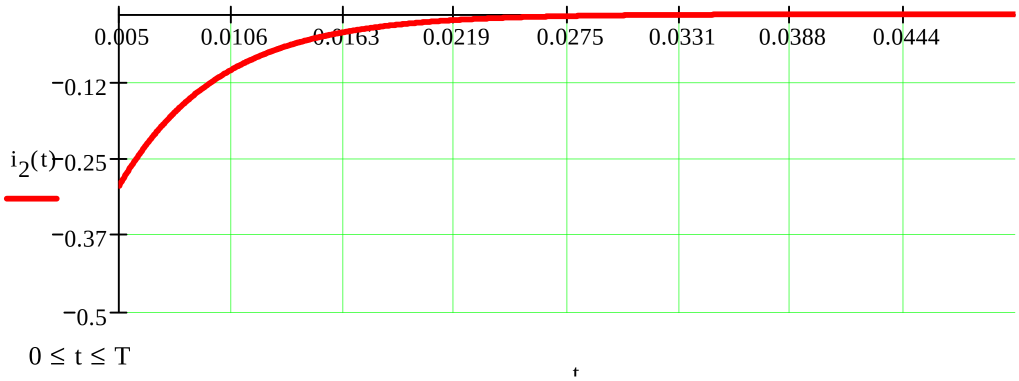
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) \, d\tau \text{ float}, 4 \; \rightarrow -175.0 + 175.0 \cdot \exp(-200. \cdot t) + 2.500 \cdot 10^4 \cdot t$$

$$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) \, d\tau + \left(U_2 - 1.5E_1\right) \cdot h_{cU}(t - T)$$

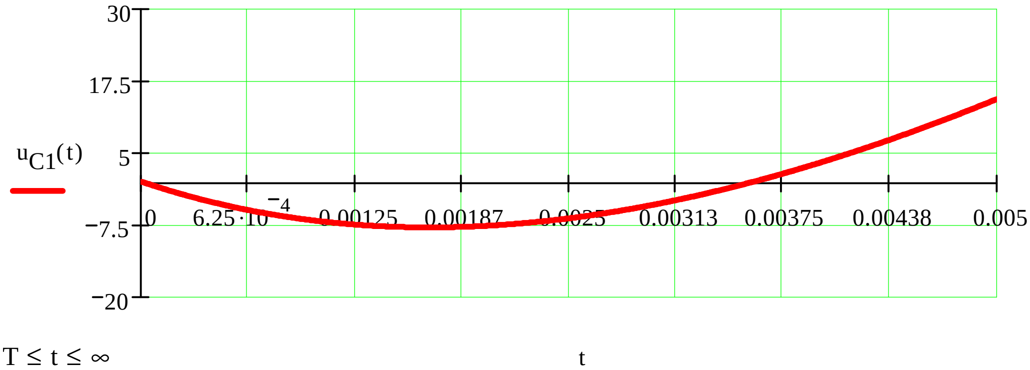
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$