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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 3202

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) побудувати в одному часовому масштабі діаграми струму та напруги на реактивних елементах.

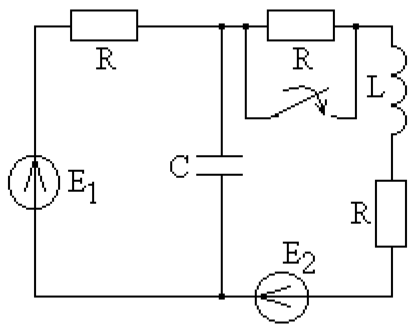
2. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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 реактивном 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.



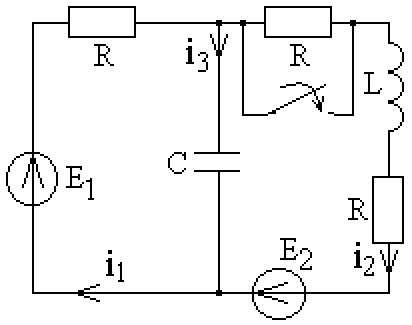
Вхідні данні:

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

$E_1 := 80$ В $\quad E_2 := 130$ В $\quad \psi := 135 \cdot deg$ C^0 $\quad \omega := 150$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1 + E_2}{3 \cdot R}$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \qquad i_{2дк} = 1.4$

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 10$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1 + E_2}{2 \cdot R}$ $\qquad i'_2 := i'_1 \qquad i'_2 = 2.1$

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

$u'_C := E_1 - i'_1 \cdot R$ $\qquad u'_C = -25$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\qquad i_{20} = 1.4$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\qquad u_{C0} = 10$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.4000 \\ 0 \\ 70. \end{pmatrix}$$

$i_{30} = 0$ $\qquad i_{10} = 1.4 \qquad u_{L0} = 70$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\qquad di_{20} = 700$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\qquad du_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

$$di_{10} = di_{20} + di_{30}$$
$$0 = du_{C0} + di_{10} \cdot R$$
$$0 = di_{20} \cdot R + du_{L0} - du_{C0}$$
$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0})$$

$di_{10} = 0$ $\quad di_{30} = -700$ $\quad du_{L0} = -3.5 \times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

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

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

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

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

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

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 i1(t):

Given

$$i_{10} - i'_1 = A \cdot \sin(v_1)$$
$$di_{10} = -A \cdot \delta \cdot \sin(v_1) + A \cdot \omega_0 \cdot \cos(v_1)$$
$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \ \mathrm{float}, 5 \ \to \begin{pmatrix} 2.2136 & -2.2136 \\ -2.8198 & .32175 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = 2.214$ $\quad v_1 = -2.82$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \ \mathrm{float}, 5 \ \to 2.2136 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - 2.8198)$$
$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \mathrm{float}, 4 \ \to 2.100 + 2.214 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - 2.820)$$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -4.9497 & 4.9497 \\ 2.9997 & -.14190 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -4.95 \qquad v_2 = 3$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -4.9497 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t + 2.9997)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 2.100 - 4.950 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t + 3.000)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -7. & 7. \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -7 \qquad v_3 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -7. \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -7. \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \Big|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -110.68 & 110.68 \\ -2.8198 & .32175 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -110.68 \qquad v_C = -2.82$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -110.68 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - 2.8198)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -25. - 110.7 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - 2.820)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \Big|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -156.52 & 156.52 \\ -.46365 & 2.6779 \end{pmatrix}$

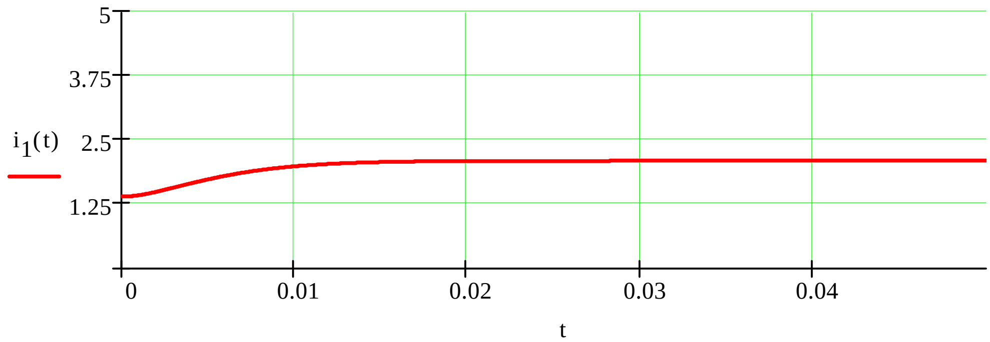
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -156.52 \qquad v_L = -0.464$

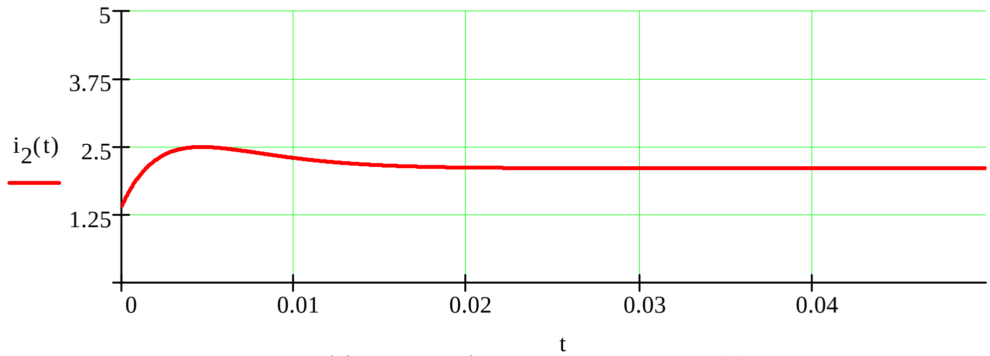
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -156.52 \cdot \exp(-300.00 \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t - .46365)$

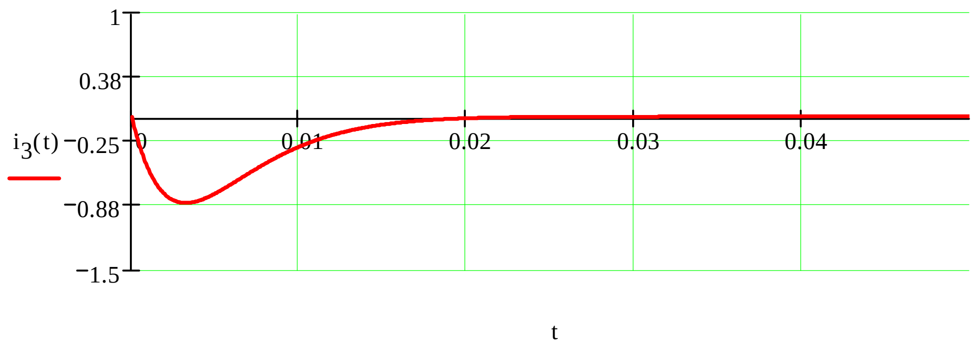
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -156.5 \cdot \exp(-300.0 \cdot t) \cdot \sin(100.0 \cdot t - .4637)$



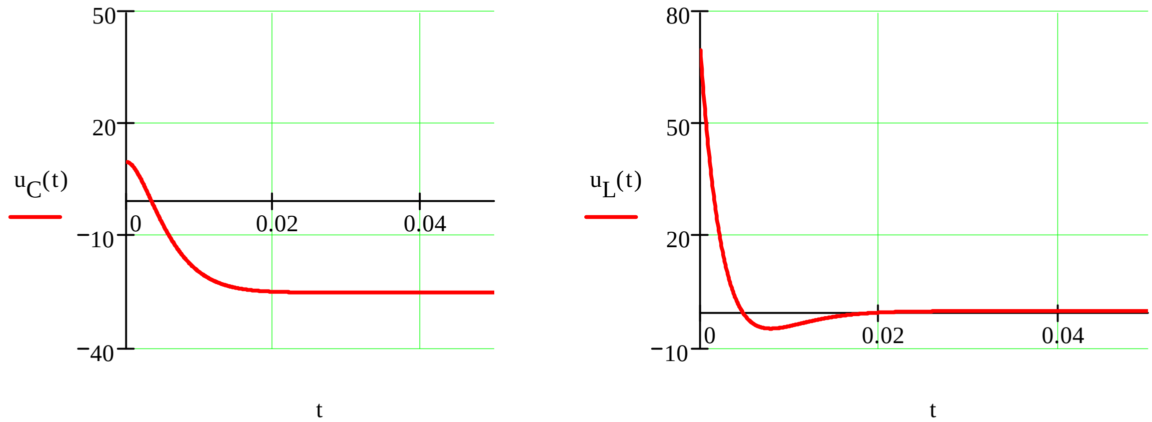
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

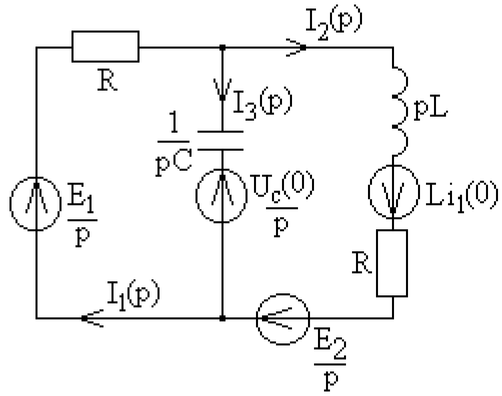


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 1.4$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 10$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк}$ $\quad i_{L0} = 1.4$

$u_{C0} = 10$

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

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

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

$$\Delta_1(p) := \left\|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right\| \quad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(4200.0 \cdot p + 1.0500 \cdot 10^6 + 7.0 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left\|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right\| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(7700.0 \cdot p + 7.0000 \cdot p^{2.} + 1.0500 \cdot 10^6\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(4200.0 \cdot p + 1.0500 \cdot 10^6 + 7.0 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 5.0 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(7700.0 \cdot p + 7.0000 \cdot p^{2.} + 1.0500 \cdot 10^6\right)}{p^{1.} \cdot \left(3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 5.0 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p)\ \Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{factor}\end{matrix} \rightarrow 10 \cdot \frac{\left(-250000 + 600 \cdot p + p^2\right)}{p \cdot \left(100000 + 600 \cdot p + p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_{k2}(p) - L \cdot i_{2дк}$$

$$u_L(p)\ \text{factor} \rightarrow 70 \cdot \frac{(p + 100)}{\left(100000 + 600 \cdot p + p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := 4200.0 \cdot p + 1.0500 \cdot 10^6 + 7.0 \cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.} \cdot \left(3000.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 5.0 \cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

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

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -300 - 100i \qquad p_2 = -300 + 100i$

$N_1(p_0) = 1.05 \times 10^6 \qquad N_1(p_1) = 3.5 \times 10^5 \qquad N_1(p_2) = 3.5 \times 10^5$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p)\ \text{factor} \rightarrow 6000 \cdot p + 500000 + 15 \cdot p^2$$

$dM_1(p_0) = 5 \times 10^5 \qquad dM_1(p_1) = -1 \times 10^5 + 3i \times 10^5 \qquad dM_1(p_2) = -1 \times 10^5 - 3i \times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 1.4$$

$$i_1(t)\ \Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 2.1000 - .70000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \cos(100.00 \cdot t) - 2.1000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 10 \cdot \left(-250000 + 600 \cdot p + p^2\right) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(100000 + 600 \cdot p + p^2\right)$$

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

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -300 + 100i \qquad p_2 = -300 - 100i$

$N_u(p_0) = -2.5 \times 10^6 \qquad N_u(p_1) = -3.5 \times 10^6 \qquad N_u(p_2) = -3.5 \times 10^6$

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

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

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 10$$

$$u_C(t) \ \Big|\begin{matrix}\text{float}, 5 \\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow -25. + 35.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \cos(100.00 \cdot t) + 105.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 70 \cdot (p + 100) \qquad M_L(p) := 100000 + 600 \cdot p + p^2$$

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

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

$$N_L(p_1) = -1.4 \times 10^4 + 7i \times 10^3 \qquad N_L(p_2) = 9.6 \times 10^4 - 1.523i \times 10^5$$

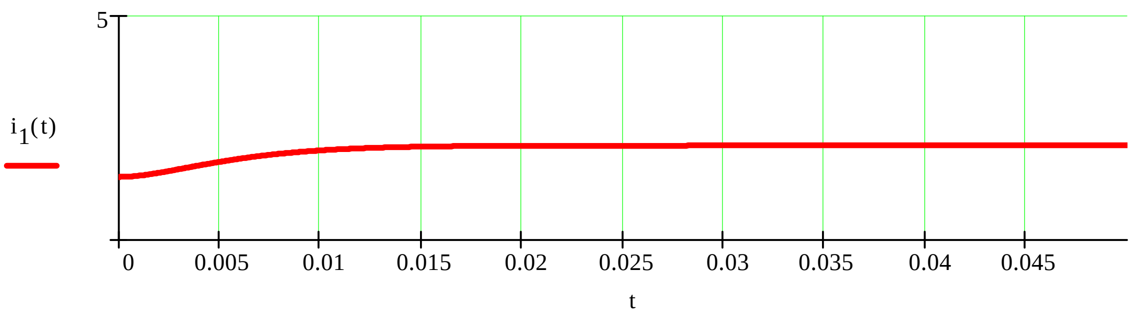
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 600 + 2 \cdot p$$

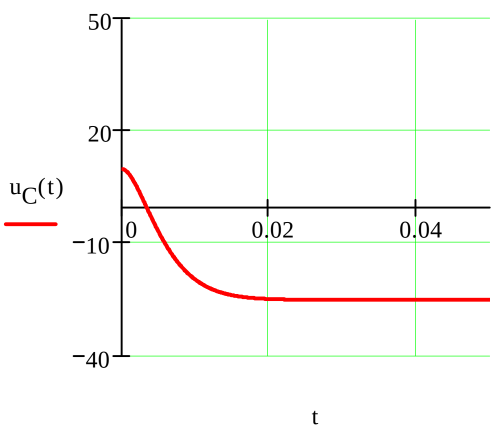
$$dM_L(p_1) = 200i \qquad dM_L(p_2) = -200i$$

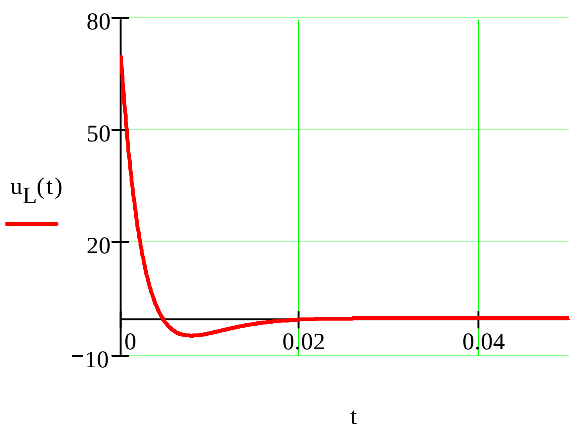
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 70$$

$$u_L(t) \ \Big|\begin{matrix}\text{float}, 5 \\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 70.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \cos(100.00 \cdot t) - 140.000 \cdot \exp(-300. \cdot t) \cdot \sin(100.00 \cdot t)$$

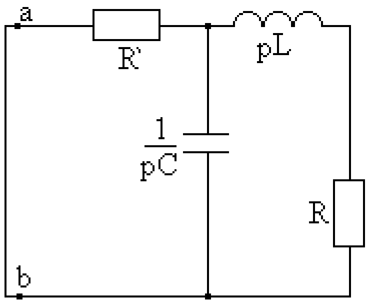






Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС Е1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

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



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

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

$D = 0$

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

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

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

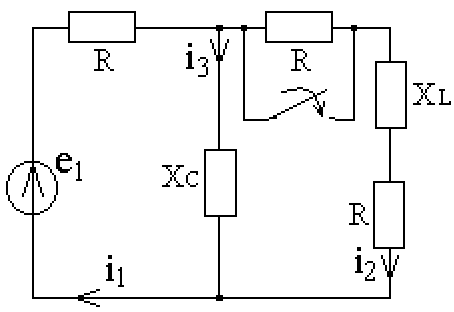
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $\qquad$ $X_C = 33.333$ $\qquad$ $X_L := \omega\cdot L$ $\qquad$ $X_L = 15$

$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\qquad$ $E_1 = -56.569 + 56.569i$ $\qquad$ $F(E_1) = (80 \;\; 135)$

$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\qquad$ $E_2 = -91.924 + 91.924i$ $\qquad$ $F(E_2) = (130 \;\; 135)$

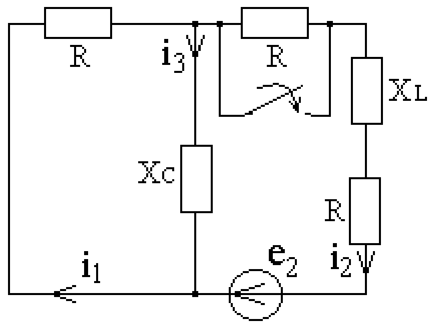


$Z'_{vx} := R + \frac{(2R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{2R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\qquad$ $Z'_{vx} = 60.75 - 31.363i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad$ $I'_{1дк} = -1.115 + 0.356i$ $\qquad$ $F(I'_{1дк}) = (1.17 \;\; 162.305)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{2R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\qquad$ $I'_{2дк} = 0.049 + 0.381i$ $\qquad$ $F(I'_{2дк}) = (0.384 \;\; 82.694)$

$I'_{3дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{2R + X_L\cdot i}{2R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\qquad$ $I'_{3дк} = -1.164 - 0.025i$ $\qquad$ $F(I'_{3дк}) = (1.164 \;\; -178.775)$



$Z''_{vx} := 2R + X_L \cdot i + \dfrac{R \cdot (-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C}$ $\qquad Z''_{vx} = 115.385 - 8.077i$

$I''_{2дк} := \dfrac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\qquad I''_{2дк} = -0.848 + 0.737i$ $\qquad F(I''_{2дк}) = (1.124 \quad 139.004)$

$I''_{1дк} := I''_{2дк} \cdot \dfrac{(-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C}$ $\qquad I''_{1дк} = 0.079 + 0.618i$ $\qquad F(I''_{1дк}) = (0.623 \quad 82.694)$

$I''_{3дк} := I''_{2дк} \cdot \dfrac{R}{R - i \cdot X_C}$ $\qquad I''_{3дк} = -0.928 + 0.119i$ $\qquad F(I''_{3дк}) = (0.935 \quad 172.694)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = -1.036 + 0.974i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (1.422 \quad 136.752)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = -0.799 + 1.118i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (1.374 \quad 125.573)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad I_{3дк} = -0.236 - 0.144i$ $\qquad F(I_{3дк}) = (0.276 \quad -148.646)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\qquad u_{Cдк} = -4.793 + 7.867i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (9.212 \quad 121.354)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -14.61 - 15.533i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (21.324 \quad -133.248)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 11.125$

$i_{Lдк}(0) = 1.581$

Given

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

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

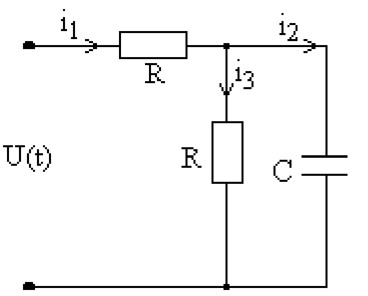
$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$

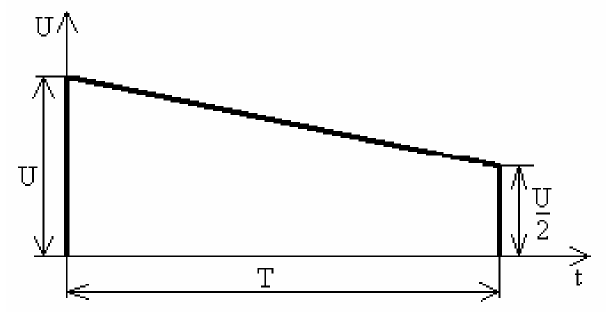
$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$

$i_{10} = 1.377$ $\qquad i_{20} = 1.581$ $\qquad i_{30} = -0.203$ $\qquad u_{L0} = 62.083$ $\qquad u_{C0} = 11.125$

Інтеграл Дюамеля

$T := 1.0$ $\quad E_1 := 80$ $\quad E := 1$





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

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

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

Отже 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:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 80$

$U_1(t) := U_0 - \frac{E_1}{2T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 80. - 8000.0 \cdot t \qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow -8000.0$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow .400 + 1.20 \cdot \exp(-200. \cdot t) - 80. \cdot t$$

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

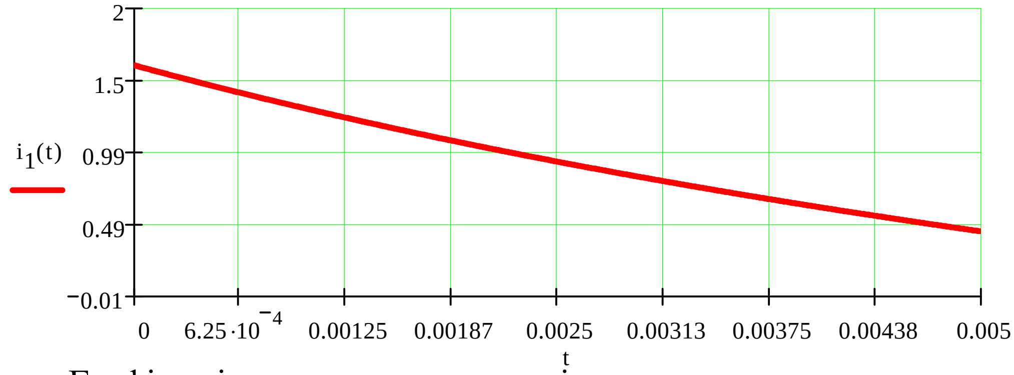
$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 1.20 \cdot \exp(-200. \cdot t) - .800 \cdot \exp(-200. \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

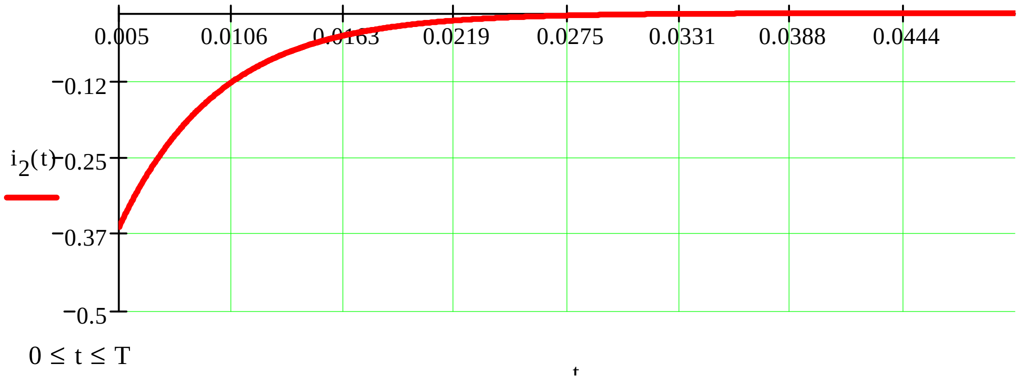
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \ \rightarrow 60.00 - 60.00 \cdot \exp(-200. \cdot t) - 4000. \cdot t$$

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

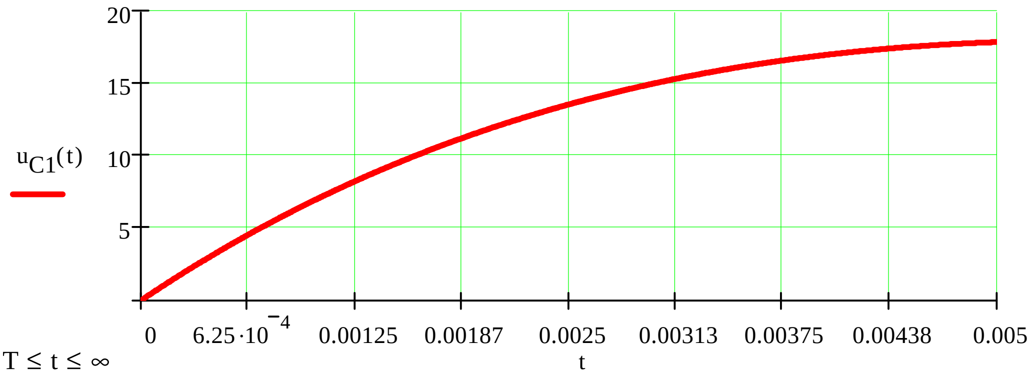
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$