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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“

Варіант № 500

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.

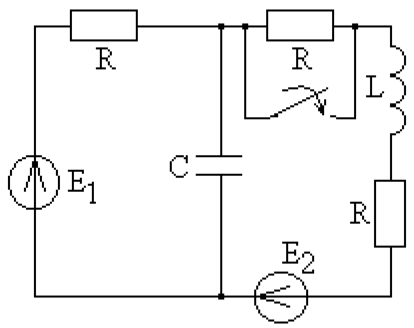
2. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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 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.



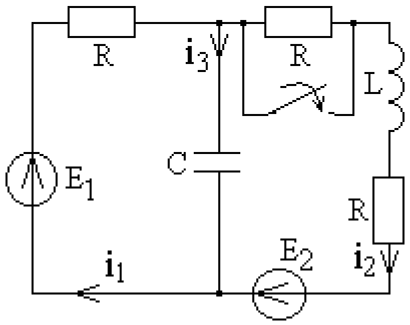
Вхідні данні:

$L := 0.15$ Гн $\quad C := 60 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 30$ 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:



Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 40$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R}$ $\quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 3$

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

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

Незалежні початкові умови

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

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad u_{C0} = 40$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 2. \\ 0 \\ 60. \end{pmatrix}$$

$i_{30} = 0$ $\quad i_{10} = 2$ $\quad u_{L0} = 60$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{20} = 400$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = 0$ $\quad di_{30} = -400$ $\quad du_{L0} = -1.2 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \Big| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -377.78 - 281.97 \cdot i \\ -377.78 + 281.97 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -377.78 - 281.97i$ $\quad p_2 = -377.78 + 281.97i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)|$ $\quad \delta = 377.78$ $\quad \omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)|$ $\quad \omega_0 = 281.97$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.6718 & -1.6718 \\ -2.5004 & .64118 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = 1.672$ $\quad v_1 = -2.5$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.6718 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t - 2.5004)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 3. + 1.672 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t - 2.500)$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.0031 & 1.0031 \\ 1.6494 & -1.4922 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -1.003$ $\quad v_2 = 1.649$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -1.0031 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t + 1.6494)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 3. - 1.003 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t + 1.649)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.4186 & 1.4186 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -1.419$ $\quad v_3 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -1.4186 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -1.419 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C) \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -50.155 & 50.155 \\ -2.5004 & .64118 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -50.155$ $\quad v_C = -2.5$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -50.155 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t - 2.5004)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 10. - 50.16 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t - 2.500)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L) \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -70.930 & 70.930 \\ -2.1333 & 1.0083 \end{pmatrix}$

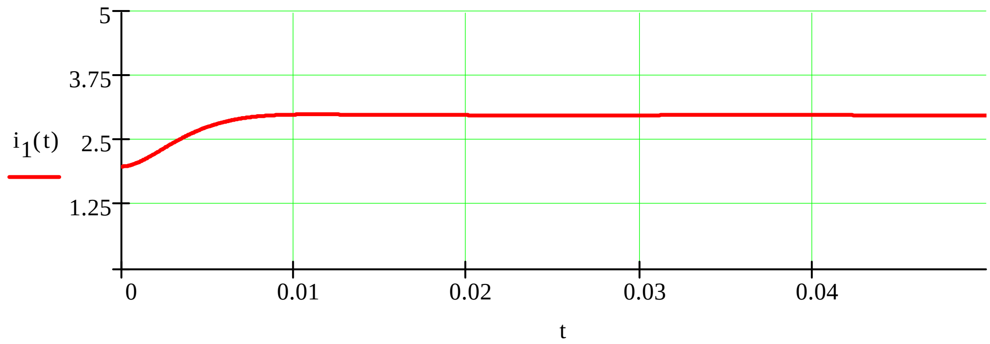
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -70.93$ $\quad v_L = -2.133$

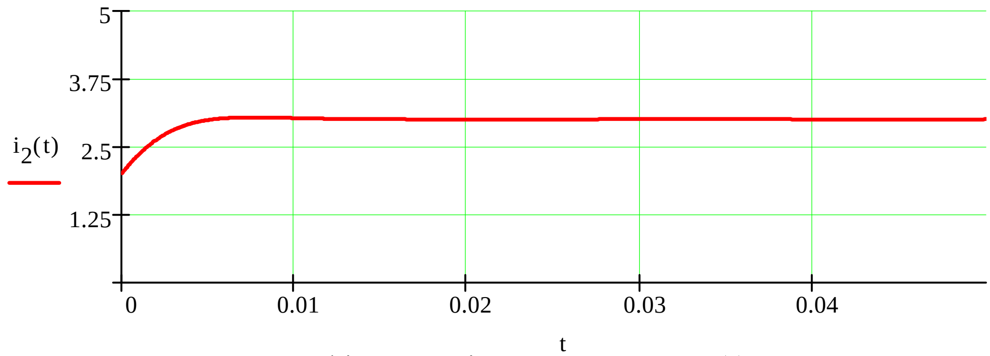
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -70.930 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t - 2.1333)$

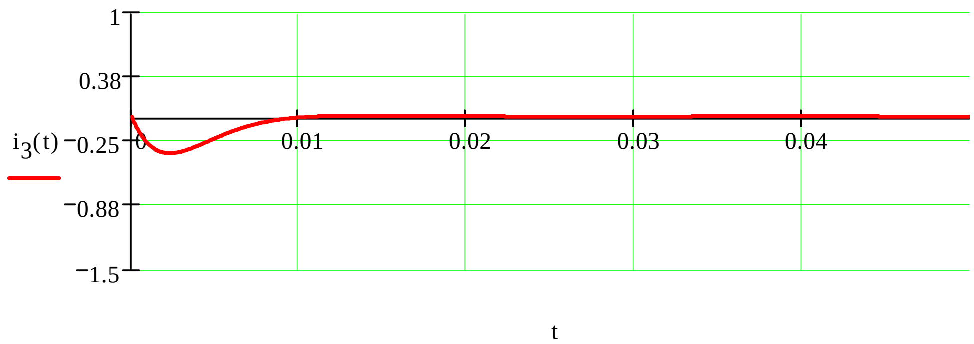
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -70.93 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t - 2.133)$



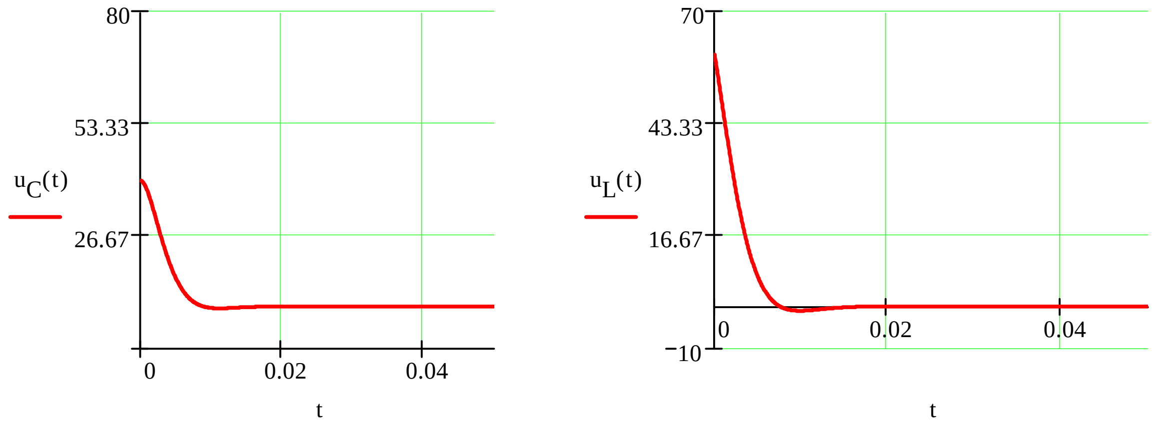
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

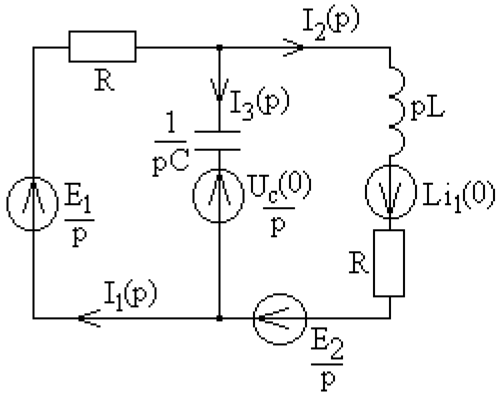


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 40$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк}$ $\qquad i_{L0} = 2$

$u_{C0} = 40$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(3400.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(6800.0 \cdot p + 3.0000 \cdot 10^6 + 9.00 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(8600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot p^{2.} + 3.0000 \cdot 10^6\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(6800.0 \cdot p + 3.0000 \cdot 10^6 + 9.00 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(3400.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(8600.0 \cdot p + 9.0000 \cdot p^{2.} + 3.0000 \cdot 10^6\right)}{p^{1.} \cdot \left(3400.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{factor}\end{matrix} \rightarrow 40 \cdot \frac{\left(499970 + 6800 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)}{p \cdot \left(2000000 + 6800 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow 60 \cdot \frac{(9 \cdot p + 5000)}{\left(2000000 + 6800 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := 6800.0 \cdot p + 3.0000 \cdot 10^6 + 9.00 \cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.} \cdot \left(3400.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 4.5000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -377.78 - 281.97 \cdot i \\ -377.78 + 281.97 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\quad p_1 = -377.78 - 281.97i$ $\quad p_2 = -377.78 + 281.97i$

$N_1(p_0) = 3 \times 10^6$ $\quad N_1(p_1) = 10 \times 10^5 + 11.279i$ $\quad N_1(p_2) = 10 \times 10^5 - 11.279i$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor } \rightarrow 6800 \cdot p + 1000000 + \frac{27}{2} \cdot p^2$$

$dM_1(p_0) = 1 \times 10^6$ $\quad dM_1(p_1) = -7.156 \times 10^5 + 9.587i \times 10^5$ $\quad dM_1(p_2) = -7.156 \times 10^5 - 9.587i \times 10^5$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 2$$

$$i_1(t) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 3.0000 - .99994 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \cos(281.97 \cdot t) - 1.33978 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 40 \cdot \left(499970 + 6800 \cdot p + 9 \cdot p^2\right) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(2000000 + 6800 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -377.78 + 281.97 \cdot i \\ -377.78 - 281.97 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0$ $\quad p_1 = -377.78 + 281.97i$ $\quad p_2 = -377.78 - 281.97i$

$N_u(p_0) = 2 \times 10^7$ $\quad N_u(p_1) = -6 \times 10^7 - 451.152i$ $\quad N_u(p_2) = -6 \times 10^7 + 451.152i$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 2000000 + 13600 \cdot p + 27 \cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 2 \times 10^6$ $\quad dM_u(p_1) = -1.431 \times 10^6 - 1.917i \times 10^6$ $\quad dM_u(p_2) = -1.431 \times 10^6 + 1.917i \times 10^6$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 40$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 9.9994 + 30.000 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \cos(281.97 \cdot t) + 40.194 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 60 \cdot (9 \cdot p + 5000) \qquad M_L(p) := 2000000 + 6800 \cdot p + 9 \cdot p^2$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -377.78 + 281.97 \cdot i \\ -377.78 - 281.97 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -377.78 + 281.97i \qquad p_2 = -377.78 - 281.97i$$

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

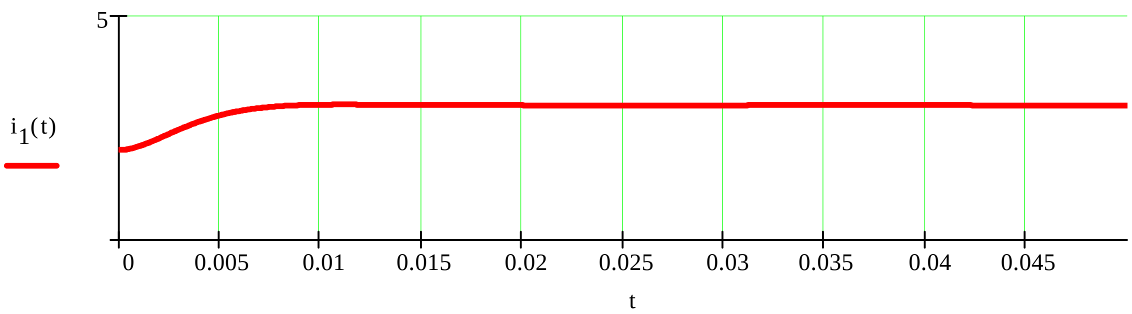
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 6800 + 18 \cdot p$$

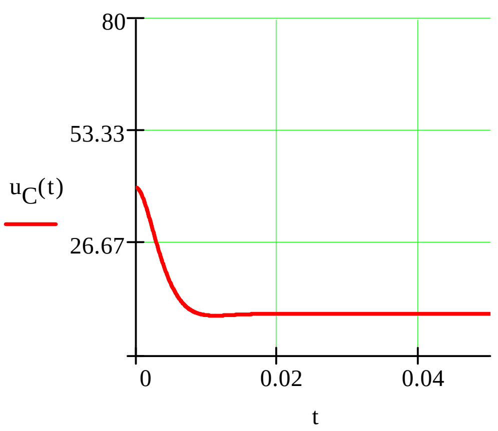
$$dM_L(p_1) = -0.04 + 5.075i \times 10^3 \qquad dM_L(p_2) = -0.04 - 5.075i \times 10^3$$

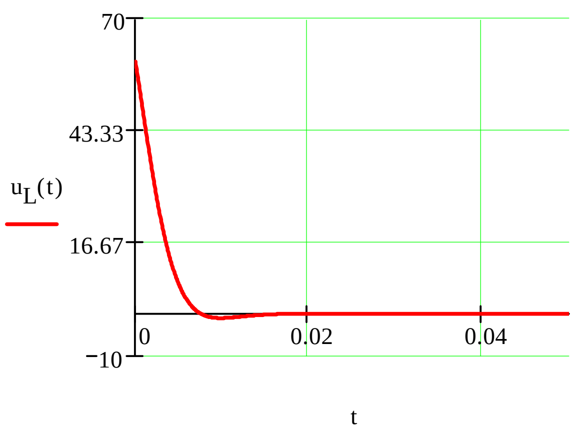
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 60$$

$$u_L(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 60.000 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \cos(281.97 \cdot t) + 37.830 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t)$$

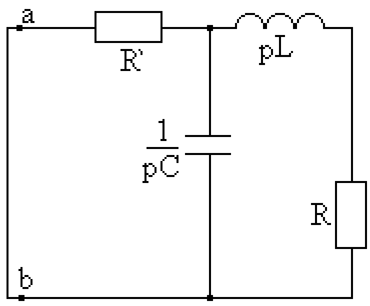






Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС Е1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R'\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \,\Bigg|\, \begin{matrix}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-35.714 \\ 19.231\end{pmatrix}$$

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

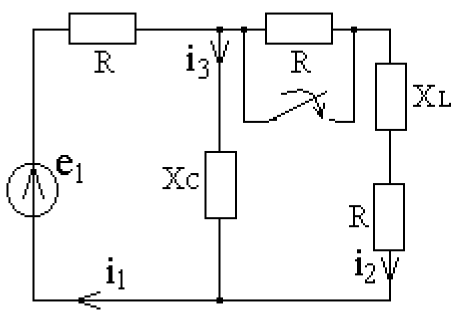
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C} \qquad X_C = 166.667 \qquad X_L := \omega\cdot L \qquad X_L = 15$$

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

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

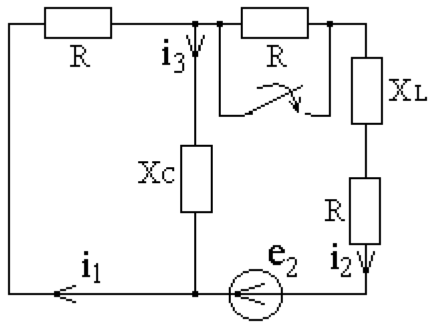


$$Z'_{vx} := R + \frac{(2R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{2R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 92.65 - 8.301i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.879 + 0.618i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.075\ \ 35.12)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{2R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 1.068 + 0.257i \qquad F(I'_{2дк}) = (1.099\ \ 13.536)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{2R + X_L\cdot i}{2R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad I'_{3дк} = -0.189 + 0.361i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.408\ \ 117.572)$$



$$Z''_{vx} := 2R + X_L \cdot i + \frac{R \cdot (-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C} \qquad Z''_{vx} = 89.059 + 9.769i$$

$$I''_{2дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{2дк} = 0.817 + 0.359i \qquad F(I''_{2дк}) = (0.893 \ \ 23.74)$$

$$I''_{1дк} := I''_{2дк} \cdot \frac{(-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C} \qquad I''_{1дк} = 0.854 + 0.206i \qquad F(I''_{1дк}) = (0.879 \ \ 13.536)$$

$$I''_{3дк} := I''_{2дк} \cdot \frac{R}{R - i \cdot X_C} \qquad I''_{3дк} = -0.037 + 0.154i \qquad F(I''_{3дк}) = (0.158 \ \ 103.536)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 1.734 + 0.824i \qquad F(I_{1дк}) = (1.92 \ \ 25.425)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 1.885 + 0.617i \qquad F(I_{2дк}) = (1.984 \ \ 18.11)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = -0.152 + 0.208i \qquad F(I_{3дк}) = (0.257 \ \ 126.156)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = 34.591 + 25.276i \qquad F(u_{Cдк}) = (42.842 \ \ 36.156)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -12.362 + 26.006i \qquad F(u_{Lдк}) = (28.794 \ \ 115.425)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 35.746$

$i_{Lдк}(0) = 0.872$

Given

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

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

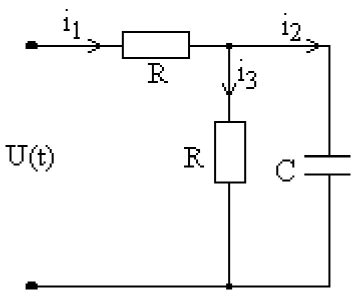
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$$

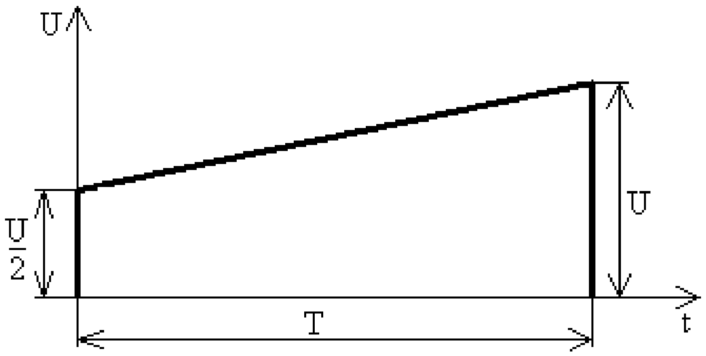
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$$

$i_{10} = 1.166$ $\quad i_{20} = 0.872$ $\quad i_{30} = 0.294$ $\quad u_{L0} = 66.154$ $\quad u_{C0} = 35.746$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R + R}$ $\qquad i'_1 = 0.017$

$i'_3 := i'_1$ $\qquad i'_3 = 0.017$ $\qquad i'_2 := 0$ $\qquad i'_2 = 0$

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

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$i_{10} = 0.033$ $\qquad i_{20} = 0.033$ $\qquad i_{30} = 0$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \;\Bigg|\begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -1111.1 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 9 \times 10^{-4}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -1.111 \times 10^{3}$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = 0.017$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 1.6667 \cdot 10^{-2} + 1.6667 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1111.1 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R+R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float},5 \ \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-1111.1 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := \frac{E_1}{2} \qquad U_0 = 50$$

$$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{2T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 50. + 55555. \cdot t \qquad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 55555.$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \ \Big|^{\text{factor}}_{\text{float},3} \rightarrow 1.67 + 926. \cdot t$$

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

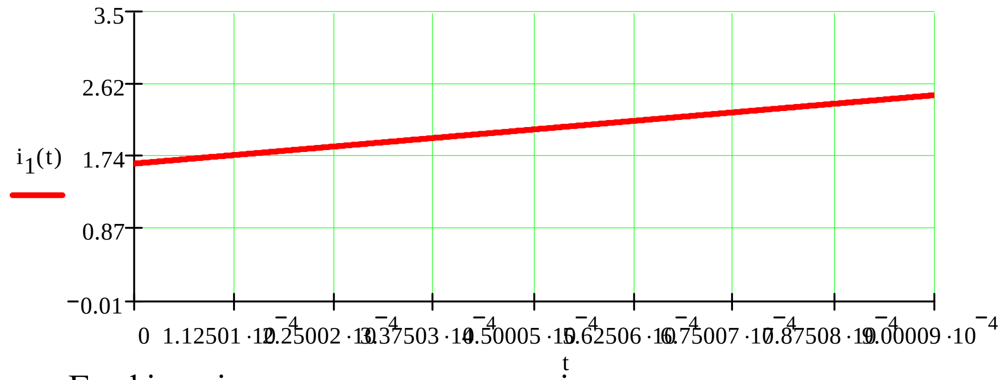
$$i_2(t) \ \Big|^{\text{factor}}_{\text{float},3} \rightarrow -.833 \cdot \exp\left(-1.11 \cdot 10^3 \cdot t + 1.\right)$$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

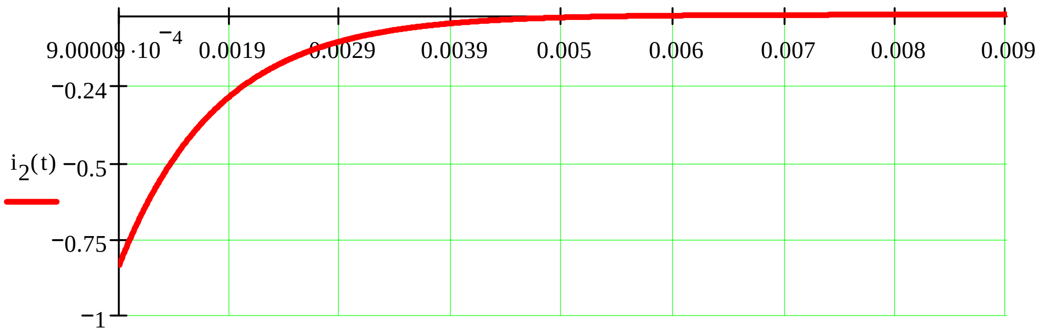
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float},4 \ \rightarrow 2.778 \cdot 10^4 \cdot t$$

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

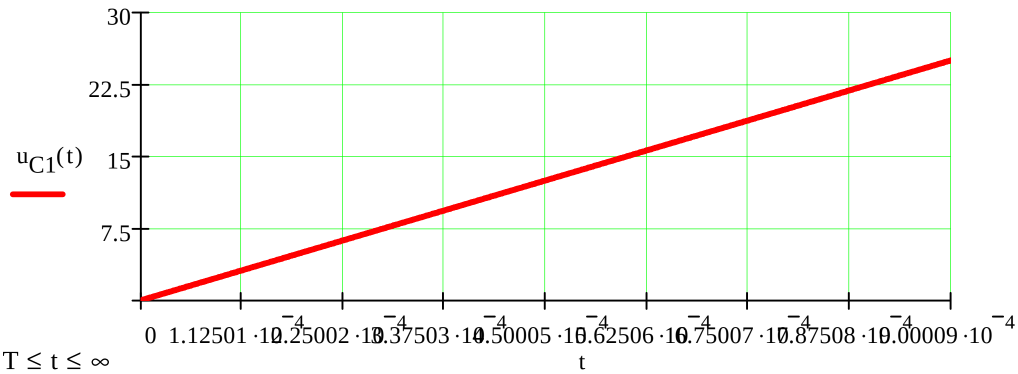
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$