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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 280

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 E1 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 E1, 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 E1і E2 в колі діють синусоїдні джерела.

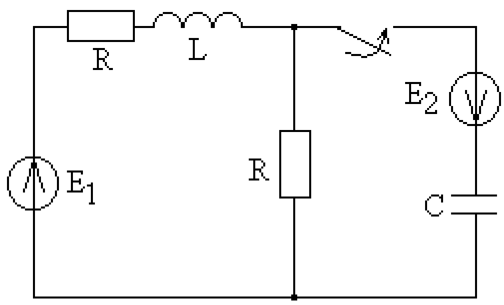
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

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

б) вважаючи, що замість ждерела постійної ЕДС E1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивном 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 елементі.



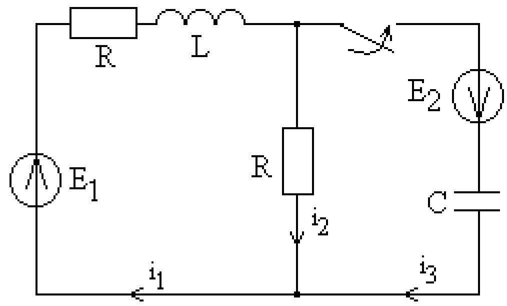
Вхідні данні:

$L := 0.1$ Гн $\quad C := 100 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 50$ Ом

$E_1 := 180$ В $\quad E_2 := 70$ В $\quad \psi := 120 \cdot deg$ С^0 $\quad \omega := 250$ с$^{-1}$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 1.8$ $\quad i_{3дк} := 0$

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2R}$ $\quad i'_2 := i'_1$ $\quad i'_2 = 1.8$ $\quad i'_3 := 0$

$u'_L := 0$ $\quad u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 160$

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк}$ $\quad i_{10} = 1.8$

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

Залежні початкові умови

Given

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

$E_1 = u_{L0} + i_{20} \cdot R + i_{10} \cdot R$

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

$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$ $\quad i_{30} = 3.2$ $\quad i_{20} = -1.4$ $\quad u_{L0} = 160$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{10} = 1.6 \times 10^3$ $\quad du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 3.2 \times 10^4$

Залежні початкові умови

Given

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

$0 = du_{L0} + di_{20} \cdot R + di_{10} \cdot R$

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

$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$ $\quad di_{20} = 640$ $\quad di_{30} = 960$ $\quad du_{L0} = -1.12 \times 10^5$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R\cdot\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) + (p\cdot L + R)\cdot\left(R+\frac{1}{p\cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -350. - 278.39\cdot i \\ -350. + 278.39\cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -350 - 278.39i \qquad p_2 = -350 + 278.39i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := \left|\mathrm{Re}(p_1)\right| \qquad \delta = 350 \qquad \omega_0 := \left|\mathrm{Im}(p_2)\right| \qquad \omega_0 = 278.39$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1)\ \text{float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 5.7473 & -5.7473 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = 5.747 \qquad v_1 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_1)\ \text{float}, 5 \rightarrow 5.7473\cdot\exp(-350.00\cdot t)\cdot\sin(278.39\cdot t)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)\ \text{float}, 4 \rightarrow 1.800 + 5.747\cdot\exp(-350.0\cdot t)\cdot\sin(278.4\cdot t)$$

Для струму i2(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \text{float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -3.6350 & 3.6350 \\ 1.0766 & -2.0650 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -3.635 \qquad v_2 = 1.077$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_2\right) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -3.6350 \cdot \exp(-350.00 \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t + 1.0766)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 4 \;\rightarrow 1.800 - 3.635 \cdot \exp(-350.0 \cdot t) \cdot \sin(278.4 \cdot t + 1.077)$$

Для струму i3(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \text{Find}\left(C, v_3\right) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \begin{pmatrix} -8.1280 & 8.1280 \\ -2.7369 & .40466 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -8.128$ $\qquad$ $v_3 = -2.737$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_3\right) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -8.1280 \cdot \exp(-350.00 \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t - 2.7369)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 4 \;\rightarrow -8.128 \cdot \exp(-350.0 \cdot t) \cdot \sin(278.4 \cdot t - 2.737)$$

Для напруги Uc(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \text{Find}\left(D, v_C\right) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -181.75 & 181.75 \\ 1.0766 & -2.0650 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -181.75$ $\qquad$ $v_C = 1.077$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_C\right) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -181.75 \cdot \exp(-350.00 \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t + 1.0766)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 4 \;\rightarrow 160. - 181.8 \cdot \exp(-350.0 \cdot t) \cdot \sin(278.4 \cdot t + 1.077)$$

Для напруги Ul(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \text{Find}\left(F, v_L\right) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -257.03 & 257.03 \\ -.67193 & 2.4697 \end{pmatrix}$$

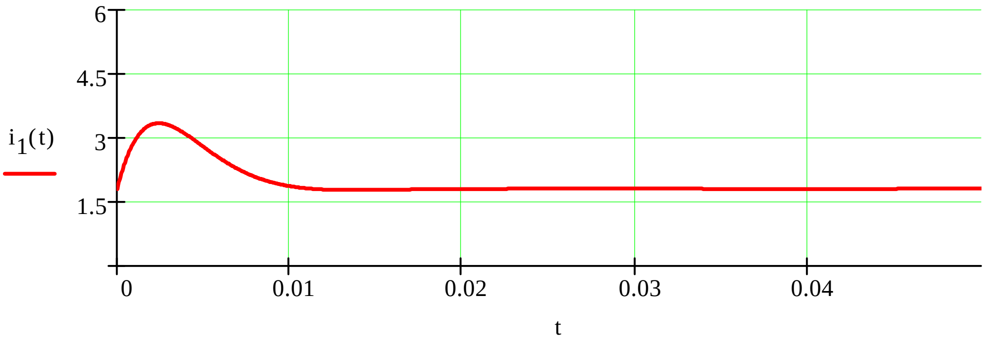
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -257.03$ $\qquad$ $v_L = -0.672$

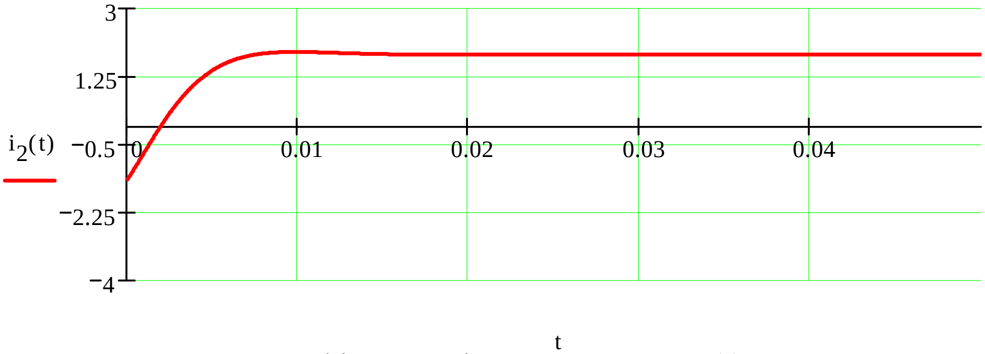
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_L\right) \text{ float}, 5 \;\rightarrow -257.03 \cdot \exp(-350.00 \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t - .67193)$$

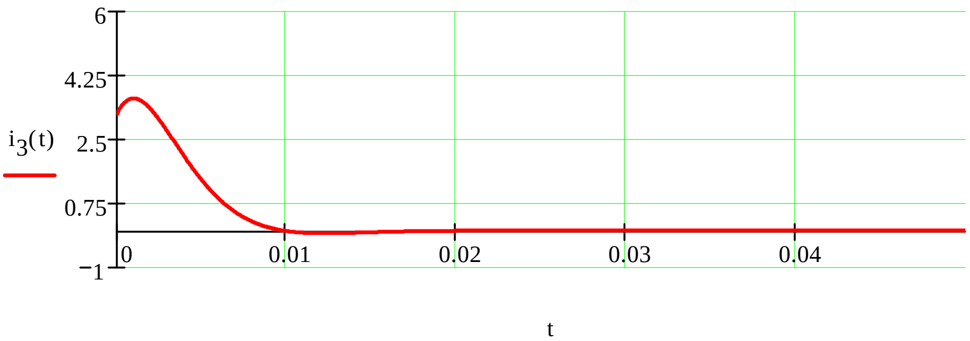
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 4 \;\rightarrow -257.0 \cdot \exp(-350.0 \cdot t) \cdot \sin(278.4 \cdot t - .6719)$$



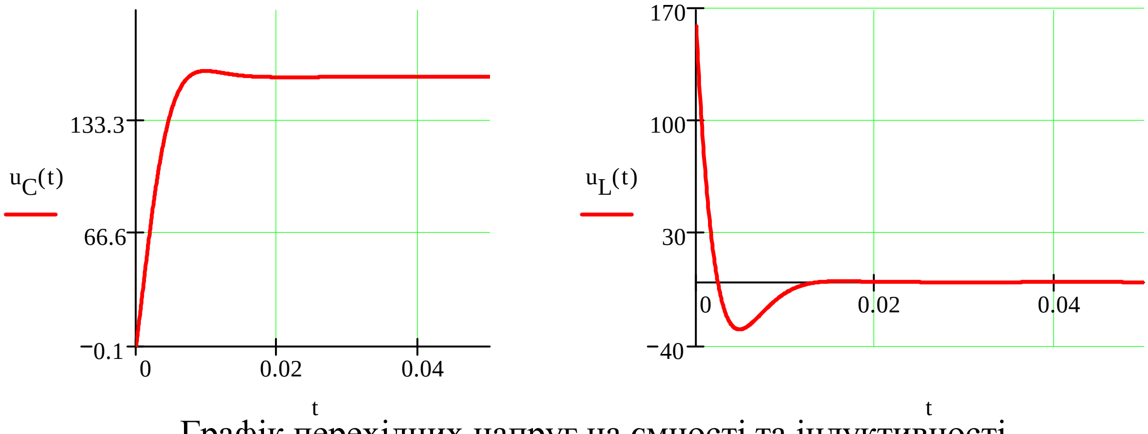
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

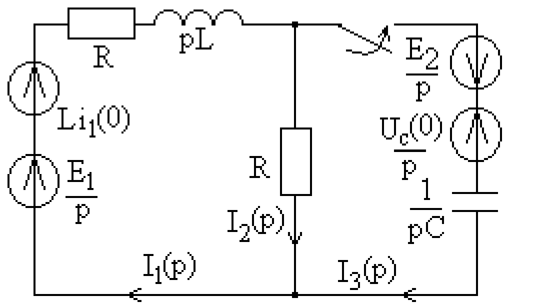


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1}{2R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк}$ $\quad i_{2дк} = 1.8$ $\quad i_{3дк} := 0$

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

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк}$ $\quad i_{L0} = 1.8$

$u_{C0} = 0$

$$I_{k1}(p)\cdot(2R + p\cdot L) - I_{k2}(p)\cdot(R) = \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0}$$

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} 2R + p\cdot L & -(R) \\ -(R) & R + \frac{1}{p\cdot C}\end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(3500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^{6} + 5.0\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}}$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0} & -(R) \\ \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & R + \frac{1}{p\cdot C}\end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(14300.\cdot p + 1.8000\cdot 10^{6} + 9.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} 2R + p\cdot L & \frac{E_1}{p} + L\cdot i_{L0} \\ -(R) & \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p}\end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{(16000. + 16.000\cdot p)}{p^{1.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(14300.\cdot p + 1.8000\cdot 10^{6} + 9.0000\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(3500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^{6} + 5.0\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_3(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{(16000. + 16.000\cdot p)}{\left(3500.0\cdot p + 1.0000\cdot 10^{6} + 5.0\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_2(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \left|\begin{matrix}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{matrix}\right. \rightarrow -.20000000000000000000\cdot\frac{\left(1700.\cdot p - 1800000. + 7.\cdot p^{2}\right)}{p\cdot\left(200000. + p^{2} + 700.\cdot p\right)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_{k1}(p) - L \cdot i_{1дк} \text{ factor } \rightarrow 160 \cdot \frac{p}{\left(200000 + p^2 + 700 \cdot p\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p \cdot C} \text{ factor } \rightarrow 32000 \cdot \frac{(1000 + p)}{\left(200000 + p^2 + 700 \cdot p\right) \cdot p}$$

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

$$N_1(p) := 14300. \cdot p + 1.8000 \cdot 10^6 + 9.0000 \cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.} \cdot \left(3500.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 5.0 \cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -350. - 278.39 \cdot i \\ -350. + 278.39 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -350 - 278.39i \qquad p_2 = -350 + 278.39i$$

$$N_1(p_0) = 1.8 \times 10^6 \qquad N_1(p_1) = -2.8 \times 10^6 - 2.227i \times 10^6 \qquad N_1(p_2) = -2.8 \times 10^6 + 2.227i \times 10^6$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow 7000. \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 15. \cdot p^{2.}$$

$$dM_1(p_0) = 1 \times 10^6 \qquad dM_1(p_1) = -7.75 \times 10^5 + 9.744i \times 10^5 \qquad dM_1(p_2) = -7.75 \times 10^5 - 9.744i \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 1.8$$

$$i_1(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow 1.8000 + 2.6850 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-350. \cdot t) \cdot \cos(278.39 \cdot t) + 5.7474 \cdot \exp(-350. \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 32000 \cdot (1000 + p) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(200000 + p^2 + 700 \cdot p\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -350. + 278.39 \cdot i \\ -350. - 278.39 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -350 + 278.39i \qquad p_2 = -350 - 278.39i$$

$$N_u(p_0) = 3.2 \times 10^7 \qquad N_u(p_1) = 2.08 \times 10^7 + 8.908i \times 10^6 \qquad N_u(p_2) = 2.08 \times 10^7 - 8.908i \times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 200000 + 3 \cdot p^2 + 1400 \cdot p$$

$$dM_u(p_0) = 2 \times 10^5 \qquad dM_u(p_1) = -1.55 \times 10^5 - 1.949i \times 10^5 \qquad dM_u(p_2) = -1.55 \times 10^5 + 1.949i \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 9.217 \times 10^{-4}$$

$$u_C(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow 160. - 160.000 \cdot \exp(-350. \cdot t) \cdot \cos(278.39 \cdot t) - 86.208 \cdot \exp(-350. \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 160p \qquad M_L(p) := 200000 + p^2 + 700 \cdot p$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \ \Big| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -350. + 278.39 \cdot i \\ -350. - 278.39 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -350 + 278.39i \qquad p_2 = -350 - 278.39i$$

$$N_L(p_1) = -5.6 \times 10^4 + 4.454i \times 10^4 \qquad N_L(p_2) = -5.6 \times 10^4 - 4.454i \times 10^4$$

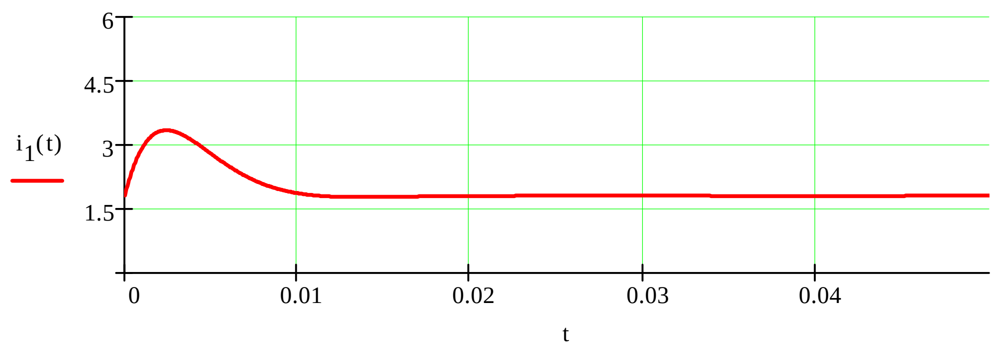
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \ \text{factor} \ \rightarrow 2 \cdot p + 700$$

$$dM_L(p_1) = 556.78i \qquad dM_L(p_2) = -556.78i$$

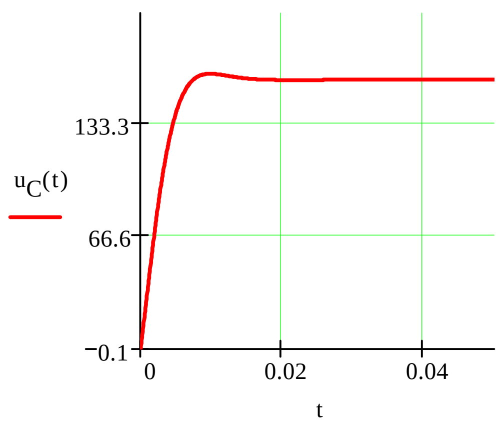
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

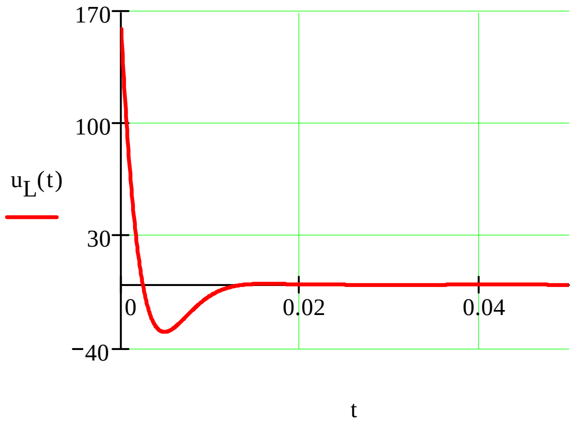
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 160$$

$$u_L(t) \ \Big| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow 160.000 \cdot \exp(-350. \cdot t) \cdot \cos(278.39 \cdot t) - 201.16 \cdot \exp(-350. \cdot t) \cdot \sin(278.39 \cdot t)$$



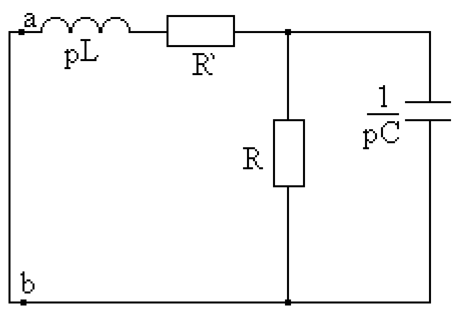
Графік перехідного струму i1(t).





Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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



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

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

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

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, R'\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-43.246\\ 83.246\end{pmatrix}$$

В схемі з данними параметрами перехід з аперіодичного процесу у коливальний буде при: $R' := 83.246$

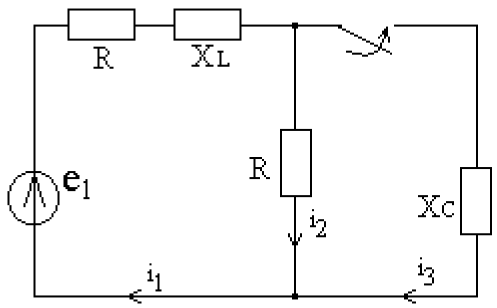
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C} \qquad X_C = 40 \qquad X_L := \omega\cdot L \qquad X_L = 25$$

$$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i} \qquad E_1 = -90 + 155.885i \qquad F(E_1) = (180\ \ 120)$$

$$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i} \qquad E_2 = -35 + 60.622i \qquad F(E_2) = (70\ \ 120)$$

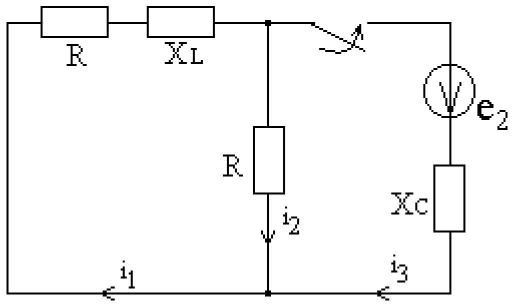


$$Z'_{vx} := i\cdot X_L + R + \frac{R\cdot(-X_C\cdot i)}{R - X_C\cdot i} \qquad Z'_{vx} = 69.512 + 0.61i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = -1.275 + 2.254i \qquad F(I'_{1дк}) = (2.589\ \ 119.497)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{-X_C\cdot i}{R - X_C\cdot i} \qquad I'_{2дк} = 0.602 + 1.501i \qquad F(I'_{2дк}) = (1.618\ \ 68.157)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = -1.877 + 0.752i \qquad F(I'_{3дк}) = (2.022\ \ 158.157)$$



$$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(i \cdot X_L + R) \cdot R}{2R + i \cdot X_L} \qquad Z''_{vx} = 26.471 - 34.118i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = -1.606 + 0.22i \qquad F(I''_{3дк}) = (1.621 \quad 172.193)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{R}{2R + i \cdot X_L} \qquad I''_{1дк} = -0.73 + 0.293i \qquad F(I''_{1дк}) = (0.786 \quad 158.157)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = -0.876 - 0.072i \qquad F(I''_{2дк}) = (0.879 \quad -175.278)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = -2.005 + 2.546i \qquad F(I_{1дк}) = (3.241 \quad 128.215)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = -0.274 + 1.429i \qquad F(I_{2дк}) = (1.455 \quad 100.866)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = -0.271 + 0.532i \qquad F(I_{3дк}) = (0.597 \quad 116.971)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = 21.284 + 10.832i \qquad F(u_{Cдк}) = (23.882 \quad 26.971)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -63.657 - 50.121i \qquad F(u_{Lдк}) = (81.021 \quad -141.785)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cдк}(0) = 15.318$$

$$i_{Lдк}(0) = 3.601$$

Given

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

$$e_1(0) = u_{L0} + i_{10} \cdot R + i_{20} \cdot R$$

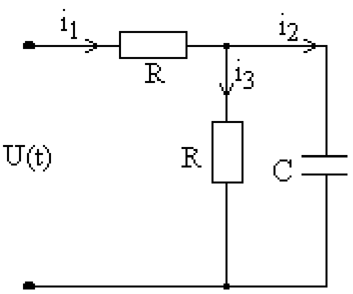
$$e_2(0) = -i_{20} \cdot 2 \cdot R + u_{C0}$$

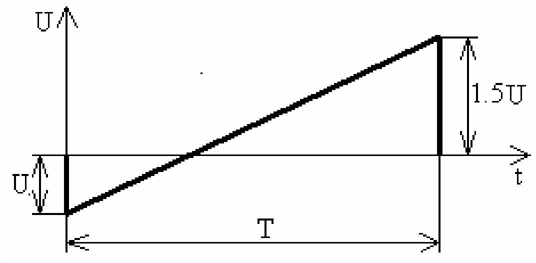
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 3.601$ $\quad i_{20} = -0.704$ $\quad i_{30} = 4.305$ $\quad u_{L0} = 75.611$ $\quad u_{C0} = 15.318$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.85$ $E_1 := 180$ $E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

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

Незалежні початкові умови

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

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

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \,\Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, p \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow -400. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 2.125 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -400$

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

Повні значення цих струмів:

$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 1.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-400. \cdot t)$

$h_{cU}(t) := E \cdot \dfrac{R}{R + R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float}, 5 \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-400. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := -E_1 \qquad U_0 = -180$

$U_1(t) := U_0 + \dfrac{2.5E_1}{T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow -180. + 2.1176 \cdot 10^5 \cdot t \qquad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \dfrac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 2.1176 \cdot 10^5$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow 3.49 - 7.09 \cdot \exp(-400. \cdot t) + 2.12 \cdot 10^3 \cdot t$

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

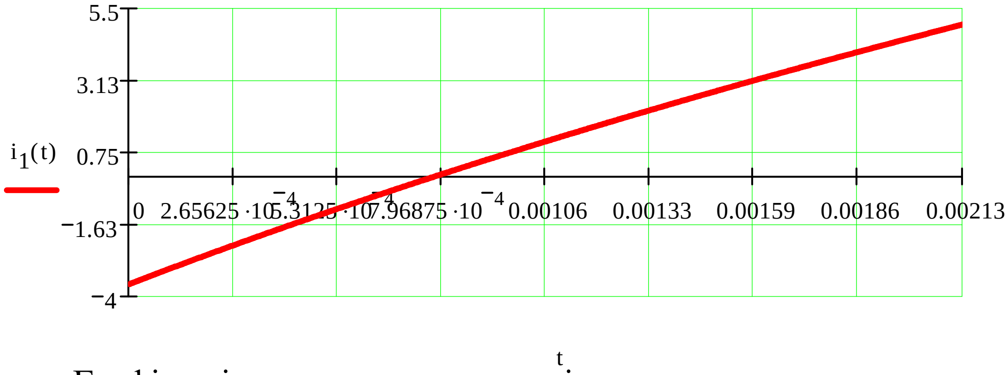
$i_2(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow -1.00 \cdot 10^{-4} - 7.09 \cdot \exp(-400. \cdot t) + 2.59 \cdot \exp(-400. \cdot t + .850)$

Напруга на індуктивнисті на цих проміжках буде мати вигляд:

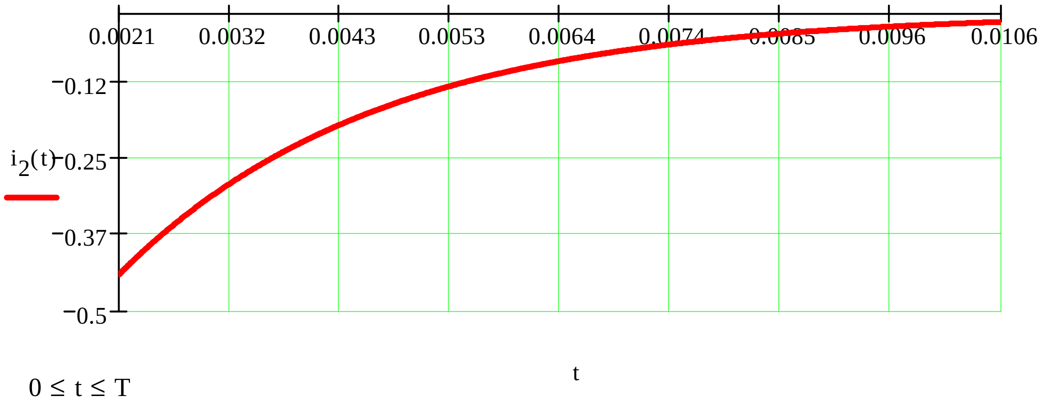
$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \rightarrow -354.7 + 354.7 \cdot \exp(-400. \cdot t) + 1.059 \cdot 10^5 \cdot t$

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

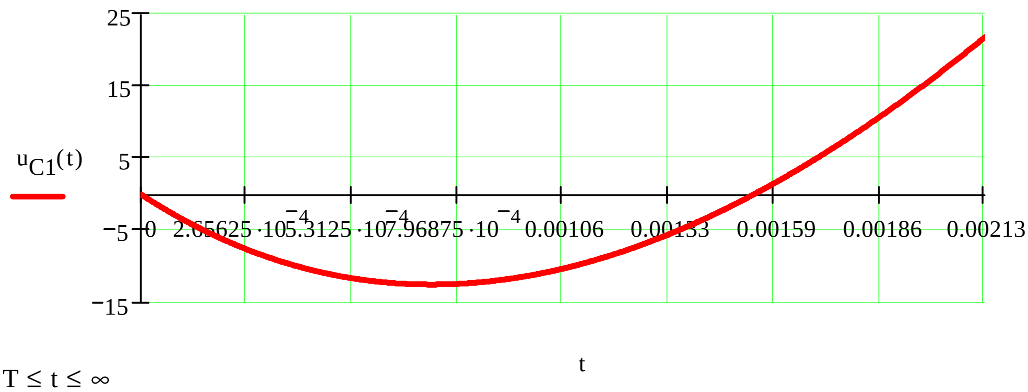
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$