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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 3178

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.

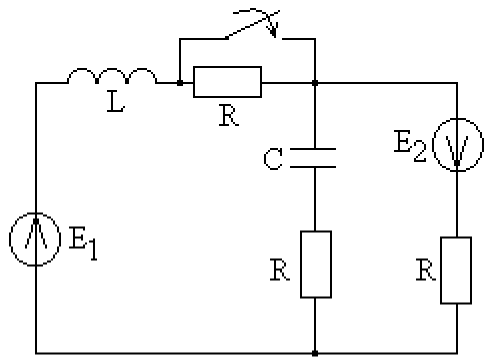
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

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.



Основна схема

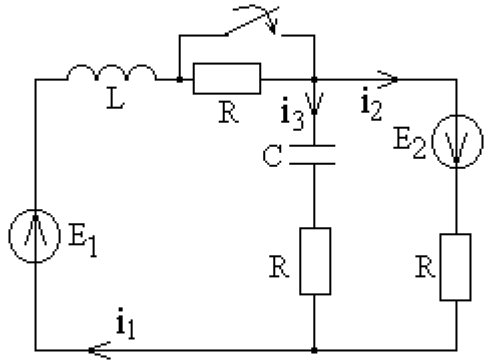
Вхідні данні:

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

$E_1 := 90$ В $E_2 := 60$ В $\psi := 45 \cdot deg$ $С^0$ $\omega := 200$ $с^{-1}$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.5$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 15$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

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

$u'_C := E_1$ $\quad u'_C = 90$

Незалежні початкові умови

$i_{10} := i_{1дк}$ $\quad i_{10} = 1.5$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\quad u_{C0} = 15$

Залежні початкові умови

Given

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

$E_1 = u_{L0} + u_{C0} + i_{30} \cdot R$

$E_2 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0}) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{3}{2} \\ 75 \end{pmatrix}$$

$i_{30} = 0 \quad i_{20} = 1.5 \quad u_{L0} = 75$

Незалежні початкові умови

$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{10} = 750$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

$$0 = di_{20} \cdot R - di_{30} \cdot R - du_{C0}$$

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

$di_{20} = 375$ $\quad$ $di_{30} = 375$ $\quad$ $du_{L0} = -1.875 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$$Z(p) := \frac{R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right)}{2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}} + p \cdot L \qquad Z(p) := \frac{R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot p \cdot L}{2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot p \cdot L \ \Bigg| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -150. - 50.000 \cdot i \\ -150. + 50.000 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -150 - 50i$ $\quad$ $p_2 = -150 + 50i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)|$ $\quad$ $\delta = 150$ $\quad$ $\omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)|$ $\quad$ $\omega_0 = 50$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \ \text{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} -10.607 & 10.607 \\ 2.9997 & -.14190 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -10.607$ $\quad$ $v_1 = 3$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \ \text{float}, 5 \ \rightarrow -10.607 \cdot \exp(-150.00 \cdot t) \cdot \sin(50.000 \cdot t + 2.9997)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \text{float}, 4 \ \rightarrow 3. - 10.61 \cdot \exp(-150.0 \cdot t) \cdot \sin(50.00 \cdot t + 3.000)$$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -3.3541 & 3.3541 \\ 2.6779 & -.46365 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -3.354$ $\qquad v_2 = 2.678$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -3.3541 \cdot \exp(-150.00 \cdot t) \cdot \sin(50.000 \cdot t + 2.6779)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 3. - 3.354 \cdot \exp(-150.0 \cdot t) \cdot \sin(50.00 \cdot t + 2.678)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} 7.5000 & -7.5000 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = 7.5$ $\qquad v_3 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 7.5000 \cdot \exp(-150.00 \cdot t) \cdot \sin(50.000 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 7.500 \cdot \exp(-150.0 \cdot t) \cdot \sin(50.00 \cdot t)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C) \left| \begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 237.17 & -237.17 \\ -2.8198 & .32175 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = 237.17$ $\qquad v_C = -2.82$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 237.17 \cdot \exp(-150.00 \cdot t) \cdot \sin(50.000 \cdot t - 2.8198)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 90. + 237.2 \cdot \exp(-150.0 \cdot t) \cdot \sin(50.00 \cdot t - 2.820)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L) \left| \begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -167.71 & 167.71 \\ -.46365 & 2.6779 \end{pmatrix}$

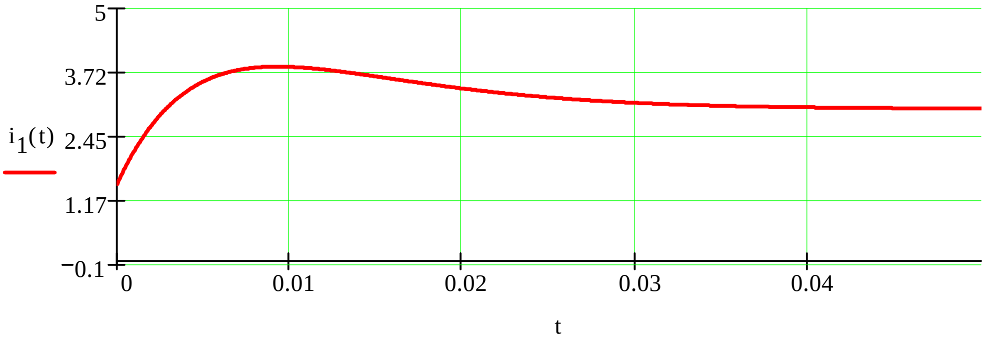
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -167.71$ $\qquad v_L = -0.464$

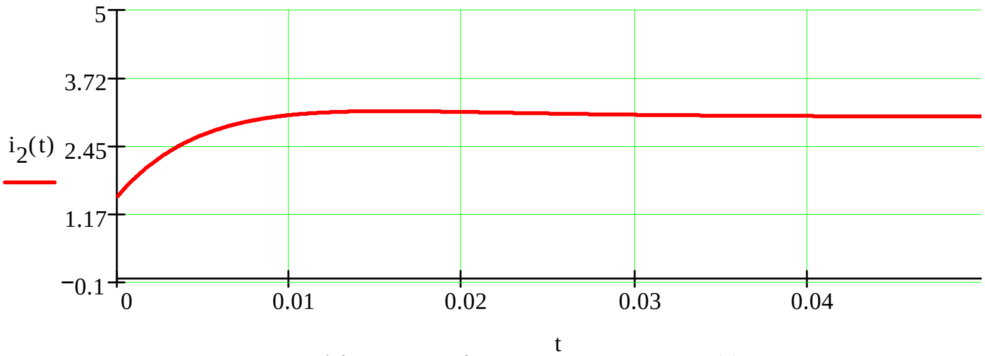
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -167.71 \cdot \exp(-150.00 \cdot t) \cdot \sin(50.000 \cdot t - .46365)$

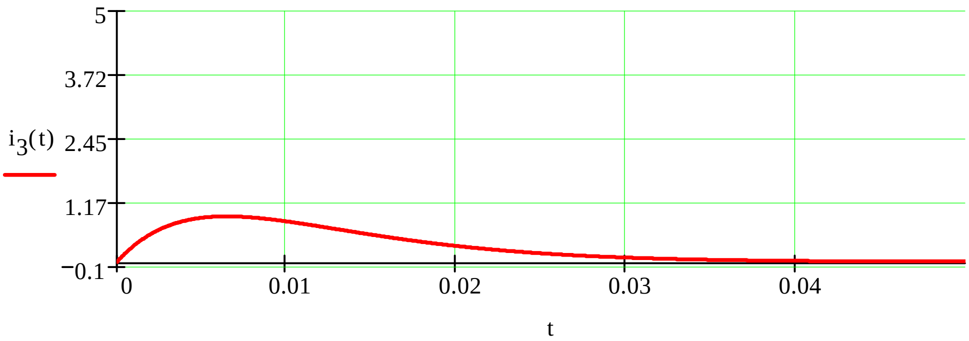
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -167.7 \cdot \exp(-150.0 \cdot t) \cdot \sin(50.00 \cdot t - .4637)$



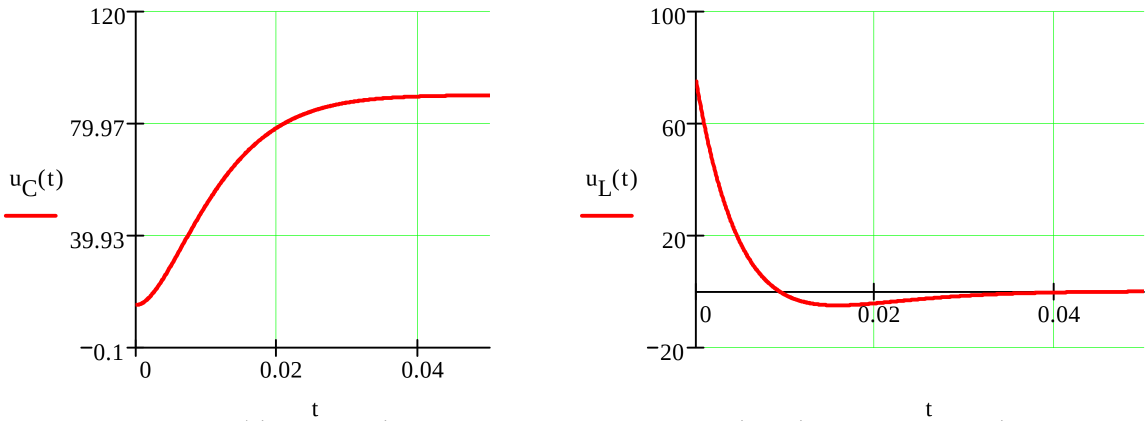
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

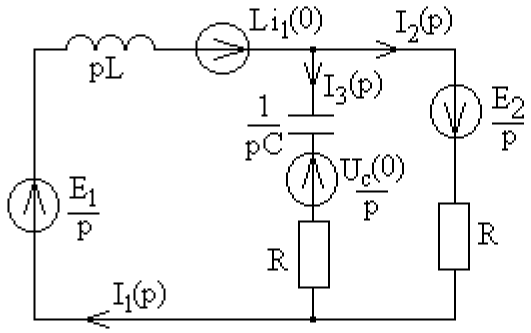


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1 + E_2}{2 \cdot R}$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.5$

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 15$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{1дк}$ $\qquad i_{L0} = 1.5$

$u_{C0} = 15$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) - I_{k2}(p) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) = \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + I_{k2}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R\right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p}$$

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \dfrac{1}{p \cdot C} & -\left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) & \dfrac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(3000.0 \cdot p + 2.5000 \cdot 10^5 + 10.0 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \dfrac{E_1}{p} - \dfrac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \\ \dfrac{E_2}{p} + \dfrac{u_{C0}}{p} & \dfrac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; \frac{\left(12000. \cdot p + 7.5000 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + p \cdot L + \dfrac{1}{p \cdot C} & \dfrac{E_1}{p} - \dfrac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} \\ -\left(R + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) & \dfrac{E_2}{p} + \dfrac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; \frac{\left(8250.0 \cdot p + 7.5000 \cdot 10^5 + 15.000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(12000.\cdot p + 7.5000\cdot 10^5 + 15.000\cdot p^{2.})}{p^{1.}\cdot(3000.0\cdot p + 2.5000\cdot 10^5 + 10.0\cdot p^{2.})^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(8250.0\cdot p + 7.5000\cdot 10^5 + 15.000\cdot p^{2.})}{p^{1.}\cdot(3000.0\cdot p + 2.5000\cdot 10^5 + 10.0\cdot p^{2.})^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix} \right. \rightarrow \frac{375.}{(300.\cdot p + 25000. + p^2)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor } \rightarrow 15\cdot\frac{(300\cdot p + 150000 + p^2)}{(300\cdot p + 25000 + p^2)\cdot p}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_1(p) - L\cdot i_{1дк}$$

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow 75\cdot\frac{(p+50)}{(300\cdot p + 25000 + p^2)}$$

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

$$N_1(p) := 12000.\cdot p + 7.5000\cdot 10^5 + 15.000\cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p\cdot(3000.0\cdot p + 2.5000\cdot 10^5 + 10.0\cdot p^{2.})$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -150. - 50.000\cdot i\\ -150. + 50.000\cdot i\end{pmatrix} \qquad p_0 = 0 \quad p_1 = -150 - 50i \qquad p_2 = -150 + 50i$$

$$N_1(p_0) = 7.5\times 10^5 \qquad N_1(p_1) = -7.5\times 10^5 - 3.75i\times 10^5 \qquad N_1(p_2) = -7.5\times 10^5 + 3.75i\times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p) \text{ factor } \rightarrow 6000\cdot p + 250000 + 30\cdot p^2$$

$$dM_1(p_0) = 2.5\times 10^5 \qquad dM_1(p_1) = -5\times 10^4 + 1.5i\times 10^5 \qquad dM_1(p_2) = -5\times 10^4 - 1.5i\times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{matrix}\text{float}, 3\\ \text{complex}\end{matrix} \right. \rightarrow 3.00 - 1.500\cdot\exp(-150.\cdot t)\cdot\cos(50.0\cdot t) + 10.50\cdot\exp(-150.\cdot t)\cdot\sin(50.0\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 15\cdot(300\cdot p + 150000 + p^2) \qquad M_u(p) := p\cdot(300\cdot p + 25000 + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -150. + 50.000\cdot i\\ -150. - 50.000\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -150 + 50i \qquad p_2 = -150 - 50i$$

$$N_u(p_0) = 2.25\times 10^6 \qquad N_u(p_1) = 1.875\times 10^6 \qquad N_u(p_2) = 1.875\times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 600 \cdot p + 25000 + 3 \cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 2.5 \times 10^4$ $\quad dM_u(p_1) = -5 \times 10^3 - 1.5i \times 10^4$ $\quad dM_u(p_2) = -5 \times 10^3 + 1.5i \times 10^4$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 15$$

$$u_C(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow 90. - 75.000 \cdot \exp(-150. \cdot t) \cdot \cos(50.000 \cdot t) - 225.00 \cdot \exp(-150. \cdot t) \cdot \sin(50.000 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := 75 \cdot (p + 50)$ $\qquad M_L(p) := \left(300 \cdot p + 25000 + p^2\right)$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -150. + 50.000 \cdot i \\ -150. - 50.000 \cdot i \end{pmatrix} \qquad p_1 = -150 + 50i \qquad p_2 = -150 - 50i$$

$N_L(p_1) = -7.5 \times 10^3 + 3.75i \times 10^3$ $\qquad N_L(p_2) = -7.5 \times 10^3 - 3.75i \times 10^3$

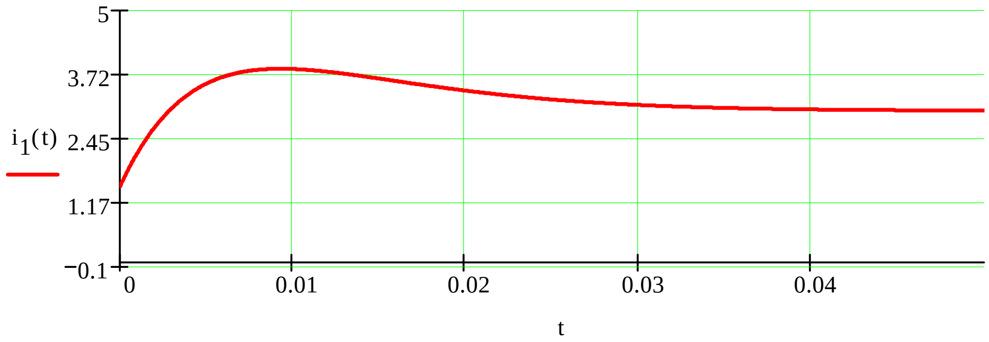
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 300 + 2 \cdot p$$

$dM_L(p_1) = 100i$ $\qquad dM_L(p_2) = -100i$

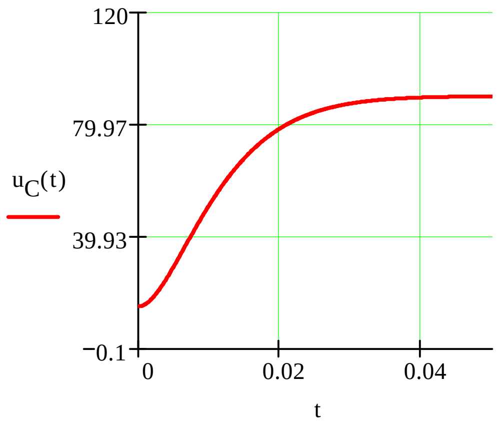
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

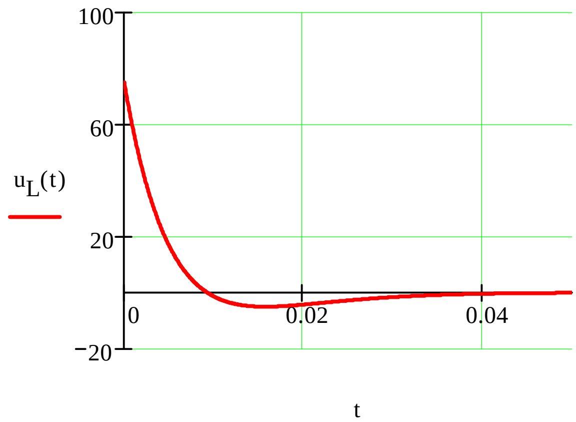
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 75$$

$$u_L(t) \left| \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow 84.374 \cdot \exp(-175. \cdot t) \cdot \cos(139.20 \cdot t) - 52.196 \cdot \exp(-175. \cdot t) \cdot \sin(139.20 \cdot t)$$



Графік перехідного струму i1(t).

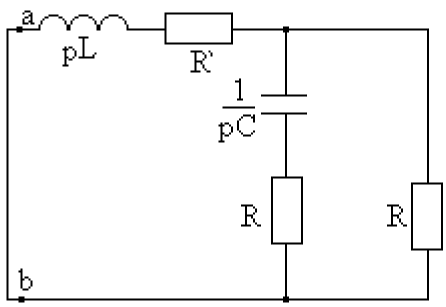




Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right)^2 - 4 \cdot (2 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -42.361 \\ 2.3607 \end{pmatrix}$$

$$R' := 2.3607$$

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

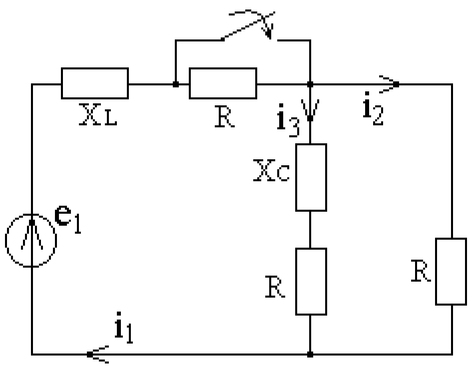
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 25 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 20$$

$$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_1 = 63.64 + 63.64i \qquad F(E_1) = (90 \;\; 45)$$

$$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i} \qquad E_2 = 42.426 + 42.426i \qquad F(E_2) = (60 \;\; 45)$$

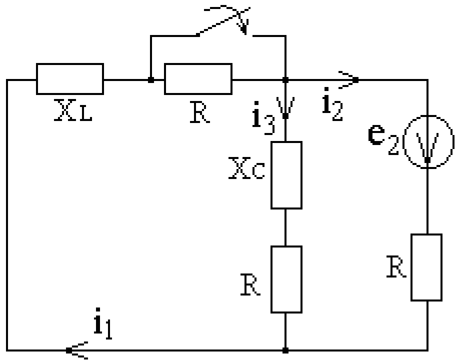


$$Z'_{vx} := R + i \cdot X_L + \frac{R \cdot (R - i \cdot X_C)}{R + R - i \cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 76.471 + 14.118i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.953 + 0.656i \qquad F(I'_{1дк}) = (1.157 \;\; 34.54)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{(R - i \cdot X_C)}{R + R - i \cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.582 + 0.235i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.628 \;\; 22.011)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = 0.371 + 0.421i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.561 \;\; 48.576)$$



$Z''_{vx} := R + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R - i \cdot X_C}$ $\qquad Z''_{vx} = 80.05 - 0.998i$

$I''_{2дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\qquad I''_{2дк} = 0.523 + 0.537i$ $\qquad F(I''_{2дк}) = (0.749 \;\; 45.714)$

$I''_{1дк} := I''_{2дк} \cdot \frac{(R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R - i \cdot X_C}$ $\qquad I''_{1дк} = 0.388 + 0.157i$ $\qquad F(I''_{1дк}) = (0.418 \;\; 22.011)$

$I''_{3дк} := I''_{2дк} - I''_{1дк}$ $\qquad I''_{3дк} = 0.135 + 0.38i$ $\qquad F(I''_{3дк}) = (0.403 \;\; 70.378)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = 1.341 + 0.813i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (1.568 \;\; 31.222)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = 1.105 + 0.772i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (1.348 \;\; 34.926)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad I_{3дк} = 0.236 + 0.041i$ $\qquad F(I_{3дк}) = (0.24 \;\; 9.917)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\qquad u_{Cдк} = 1.032 - 5.902i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (5.991 \;\; -80.083)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -16.261 + 26.826i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (31.37 \;\; 121.222)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -8.346$

$i_{Lдк}(0) = 1.15$

Given

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

$e_1(0) = u_{L0} + u_{C0} + i_{30} \cdot R$

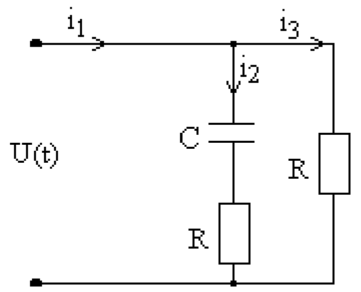
$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0}$

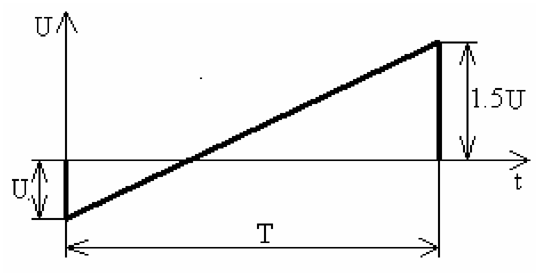
$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$i_{10} = 1.15$ $\qquad i_{20} = 1.091$ $\qquad i_{30} = 0.058$ $\qquad u_{L0} = 95.428$ $\qquad u_{C0} = -8.346$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.9$ $E_1 := 90$ $E := 1$





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R}$ $i'_1 = 0.02$

$i'_3 := i'_1$ $i'_3 = 0.02$ $i'_2 := 0$ $i'_2 = 0$

$u'_C := E - i'_2 \cdot R$ $u'_C = 1$

Незалежні початкові умови

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $u_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$0 = u_{C0} - i_{20} \cdot R + i_{30} \cdot R$

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

$i_{10} = 0.04$ $i_{20} = 0.02$ $i_{30} = 0.02$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$$Z_{vx}(p) := \frac{R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right)}{R + R + \frac{1}{p \cdot C}} \qquad p := R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R\right) \Bigg| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -100.$$

$T := \frac{1}{|p|} \cdot T$ $T = 9 \times 10^{-3}$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -100$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = 0.02$$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 2.0000 \cdot 10^{-2} + 2.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-100. \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := A_1 \cdot R - A_1 \cdot R \cdot e^{p \cdot t} \text{ float}, 5 \ \rightarrow 1. - 1. \cdot \exp(-100. \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := -E_1 \qquad U_0 = -90$$

$$U_1(t) := U_0 + \frac{2.5E_1}{T} \cdot t \qquad U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow -90. + 25000. \cdot t \qquad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \ \rightarrow 25000.$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \qquad i_1(t) \ \Bigg| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 2 \end{array} \rightarrow 3.2 - 6.8 \cdot \exp\left(-1.0 \cdot 10^2 \cdot t\right) + 5.0 \cdot 10^2 \cdot t$$

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

$$i_2(t) \ \Bigg| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \rightarrow -6.80 \cdot \exp(-100. \cdot t) + 2.30 \cdot \exp(-100. \cdot t + .900)$$

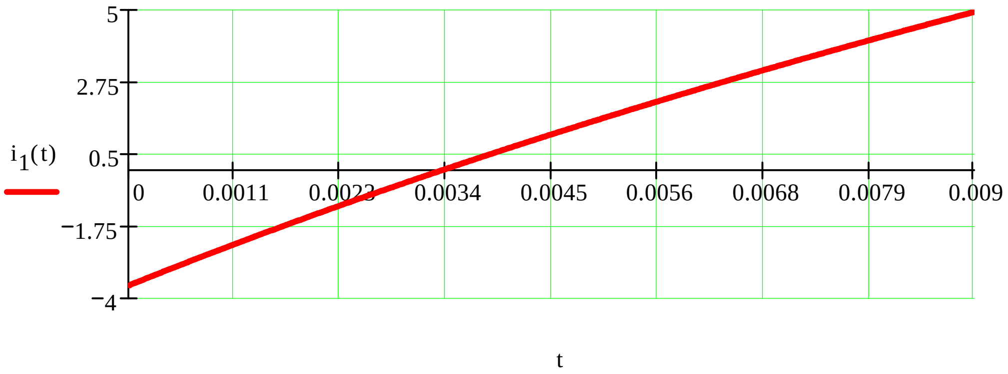
Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 5 \ \rightarrow -340. + 340. \cdot \exp(-100. \cdot t) + 25000. \cdot t$$

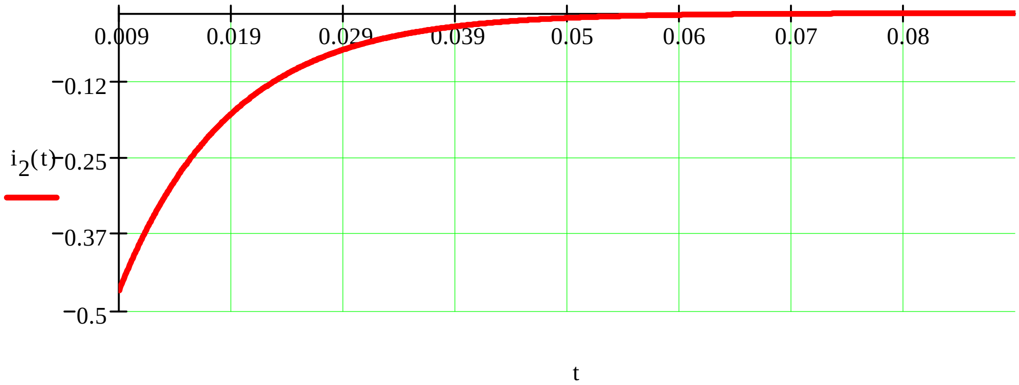
$$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau + \left(U_2 - 1.5E_1\right) \cdot h_{cU}(t - T)$$

$$u_{C2}(t) \text{ float}, 3 \ \rightarrow 340. \cdot \exp(-100. \cdot t) - 115. \cdot \exp(-100. \cdot t + .900)$$

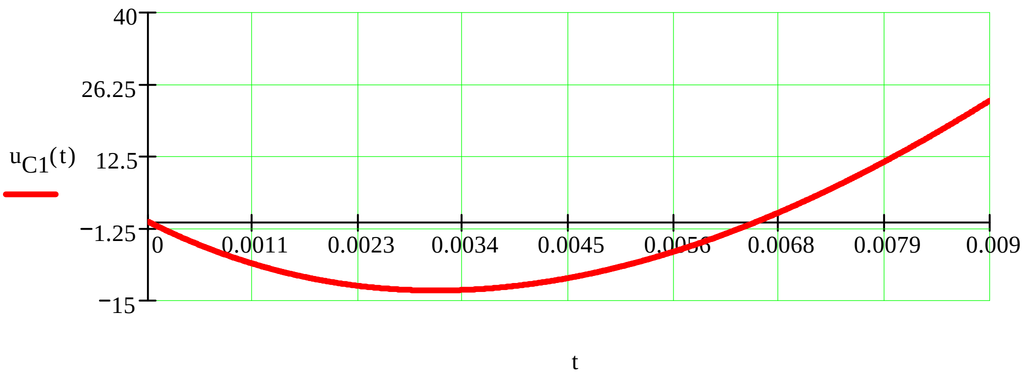
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



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



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