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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 514

Виконав: ________________
____
____
____

Перевірив: _______________

Київ 2007

Умова задання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

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

2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС Е1 та напругу на реактивному елементі операторним методом;

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

2. Дослідити, яким повинен бути активний опір у вітці з джерелом Е1, щоб перехідний процес проходив в граничному режимі.

3. Визначити струми в вітках та напруги на реактивних елементах в момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійних ЕДС Е1і Е2 в колі діють синусоїдні джерела.

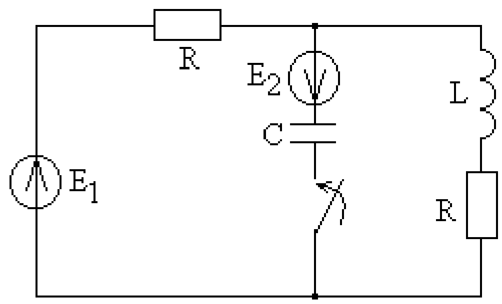
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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

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

в) розрахувати вхідний струм та напругу на 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.



Основна схема

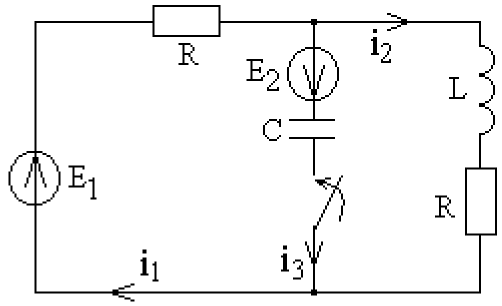
Вхідні данні:

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

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

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\quad$ $u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\quad$ $u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad$ $i'_2 := i'_1$ $\quad$ $i'_2 = 1.5$

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

$u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad$ $u'_C = 105$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad$ $i_{20} = 1.5$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \rightarrow \begin{pmatrix} 5 \\ \frac{7}{2} \\ -105 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 5$ $\quad$ $i_{30} = 3.5$ $\quad$ $u_{L0} = -105$

Незалежні початкові умови

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

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\quad$ $du_{C0} = 5.833 \times 10^4$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = -1.944 \times 1($ $di_{30} = -1.244 \times 10^{3}$ $du_{L0} = 7.933 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \left|\begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 6 \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -377.778 - 281.968 \cdot i \\ -377.778 + 281.968 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -377.778 - 281.968i$ $\qquad$ $p_2 = -377.778 + 281.968i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := \left|\mathrm{Re}\left(p_1\right)\right|$ $\quad \delta = 377.778$ $\qquad \omega_0 := \left|\mathrm{Im}\left(p_2\right)\right|$ $\quad \omega_0 = 281.968$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

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

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

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

Визначення сталих інтегрування:

Для струму i1(t):

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(A, v_1\right) \ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} -4.1376 & 4.1376 \\ -1.0083 & 2.1333 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -4.138$ $\qquad$ $v_1 = -1.008$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + v_1\right) \ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow -4.1376 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t - 1.0083)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \mathrm{float}, 4 \ \rightarrow 1.500 - 4.138 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t - 1.008)$$

Для струму i2(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -2.4826 & 2.4826 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -2.483$ $\qquad v_2 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -2.4826 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 1.500 - 2.483 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t)$

Для струму i3(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -3.5109 & 3.5109 \\ -1.6494 & 1.4921 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -3.511$ $\qquad v_3 = -1.649$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -3.5109 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t - 1.6494)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -3.511 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t - 1.649)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -124.13 & 124.13 \\ 2.1333 & -1.0083 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -124.13$ $\qquad v_C = 2.133$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -124.13 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t + 2.1333)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 105. - 124.1 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t + 2.133)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -175.54 & 175.54 \\ 2.5004 & -.64118 \end{pmatrix}$$

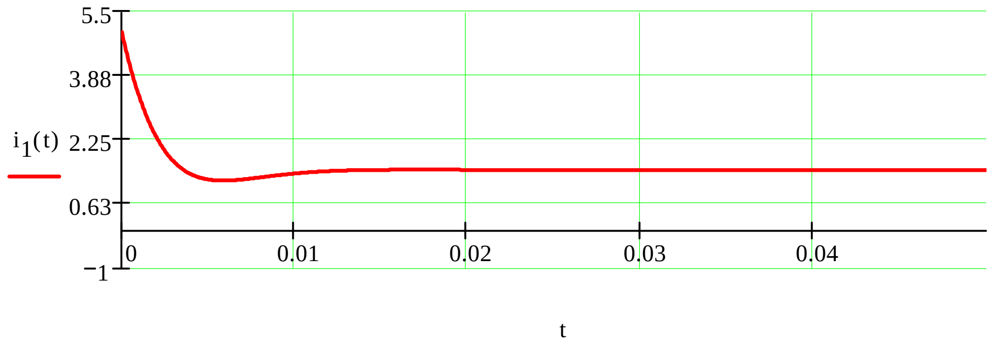
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -175.54$ $\qquad v_L = 2.5$

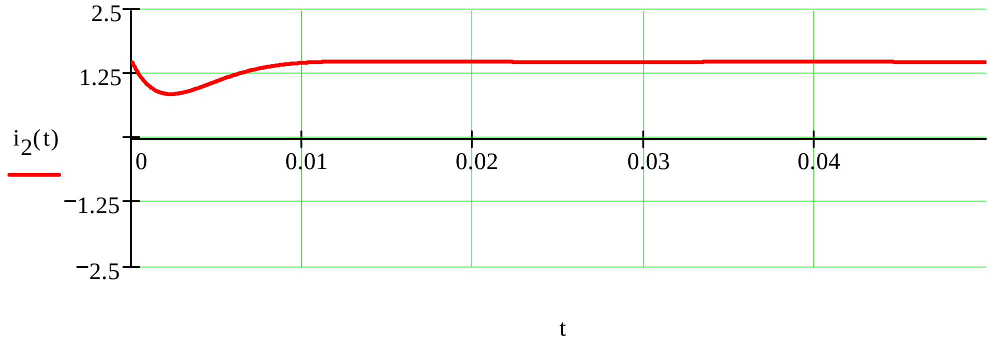
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -175.54 \cdot \exp(-377.78 \cdot t) \cdot \sin(281.97 \cdot t + 2.5004)$

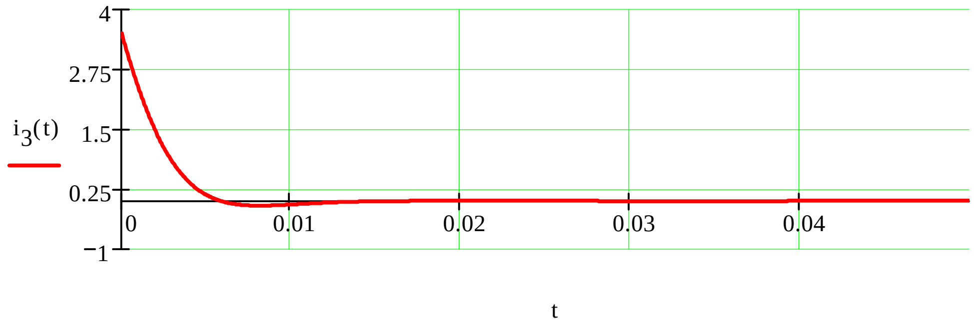
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -175.5 \cdot \exp(-377.8 \cdot t) \cdot \sin(282.0 \cdot t + 2.500)$



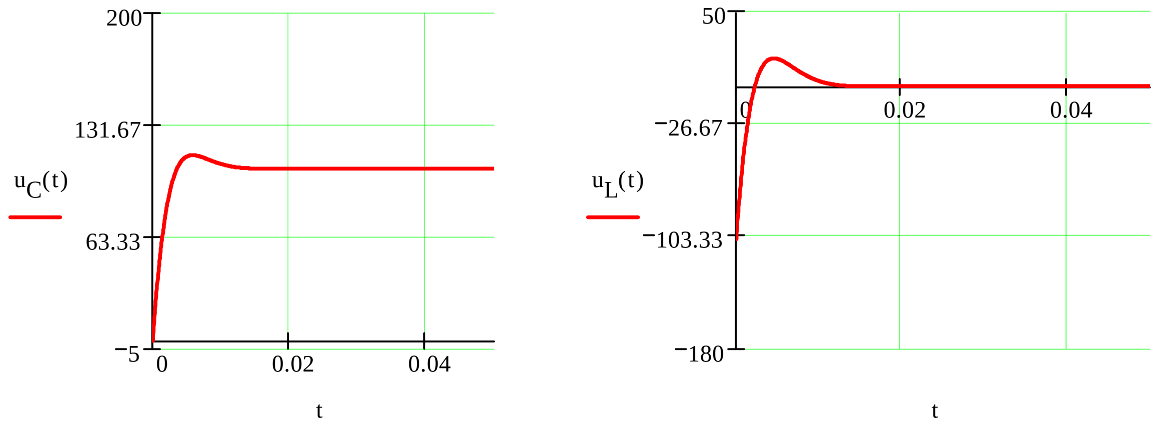
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

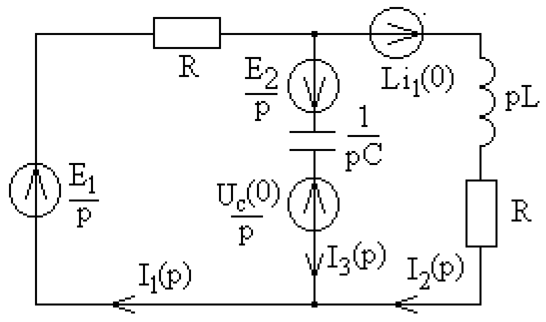


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0 \quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - i_{1дк} \cdot R \quad u_{Cдк} = 105$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \quad i_{L0} = 1.5$

$u_{C0} = 0$

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

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

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

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \frac{\left(1.5000 \cdot 10^6 + 8250.0 \cdot p + 22.50 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \;\rightarrow \frac{\left(1.5000 \cdot 10^6 + 1950.0 \cdot p + 6.7500 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(1.5000\cdot 10^6 + 8250.0\cdot p + 22.50\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(1.0000\cdot 10^6 + 3400.0\cdot p + 4.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{\left(1.5000\cdot 10^6 + 1950.0\cdot p + 6.7500\cdot p^{2.}\right)}{p^{1.}\cdot\left(1.0000\cdot 10^6 + 3400.0\cdot p + 4.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p)\ \Big|\begin{smallmatrix}\text{float},5\\ \text{simplify}\end{smallmatrix} \rightarrow 31.500000000000000000\cdot\frac{(400. + p)}{\left(2000000. + 6800.\cdot p + 9.\cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L\cdot p\cdot I_2(p) - L\cdot i_{2дк}\ \text{factor}\ \rightarrow -945\cdot\frac{p}{\left(2000000 + 6800\cdot p + 9\cdot p^2\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p\cdot C}\ \text{factor}\ \rightarrow 525000\cdot\frac{(400 + p)}{\left(2000000 + 6800\cdot p + 9\cdot p^2\right)\cdot p}$$

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

$$N_1(p) := 1.5000\cdot 10^6 + 8250.0\cdot p + 22.50\cdot p^{2.} \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot\left(1.0000\cdot 10^6 + 3400.0\cdot p + 4.5000\cdot p^{2.}\right)^{1.}$$

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

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

$N_1(p_0) = 1.5\times 10^6 \qquad N_1(p_1) = -1.944\times 10^5 + 2.467i\times 10^6 \qquad N_1(p_2) = -1.944\times 10^5 - 2.467i\times 10^6$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p)\ \Big|\begin{smallmatrix}\text{factor}\\ \text{float},5\end{smallmatrix} \rightarrow 1.0000\cdot 10^6 + 6800.\cdot p + 13.500\cdot p^{2.}$$

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad i_1(0) = 5$$

$$i_1(t)\ \Big|\begin{smallmatrix}\text{float},5\\ \text{complex}\end{smallmatrix} \rightarrow 1.5000 + 3.5000\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\cos(281.97\cdot t) - 2.2066\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 525000\cdot(400 + p) \qquad M_u(p) := p\cdot\left(2000000 + 6800\cdot p + 9\cdot p^2\right)$$

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

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

$N_u(p_0) = 2.1\times10^8$ $N_u(p_1) = 1.167\times10^7 + 1.48i\times10^8$ $N_u(p_2) = 1.167\times10^7 - 1.48i\times10^8$

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

$dM_u(p_0) = 2\times10^6$ $dM_u(p_1) = -1.431\times10^6 - 1.917i\times10^6$ $dM_u(p_2) = -1.431\times10^6 + 1.917i\times10^6$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = 1.306\times10^{-3}$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 105. - 104.998\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\cos(281.97\cdot t) + 66.200\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := -945p$ $M_L(p) := \left(2000000 + 6800\cdot p + 9\cdot p^2\right)$

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

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

$N_L(p_1) = 3.57\times10^5 - 2.665i\times10^5$ $N_L(p_2) = 3.57\times10^5 + 2.665i\times10^5$

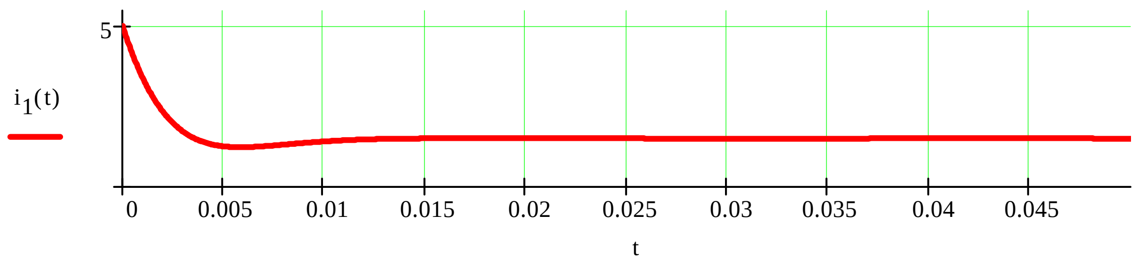
$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p)$ factor $\rightarrow 6800 + 18\cdot p$

$dM_L(p_1) = -0.04 + 5.075i\times10^3$ $dM_L(p_2) = -0.04 - 5.075i\times10^3$

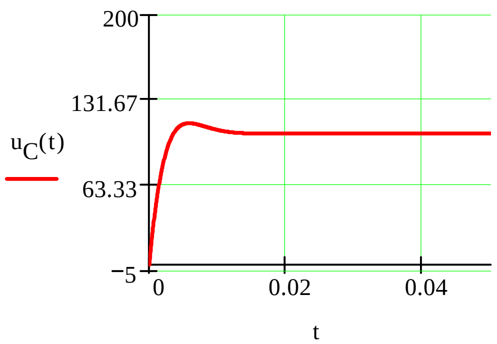
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

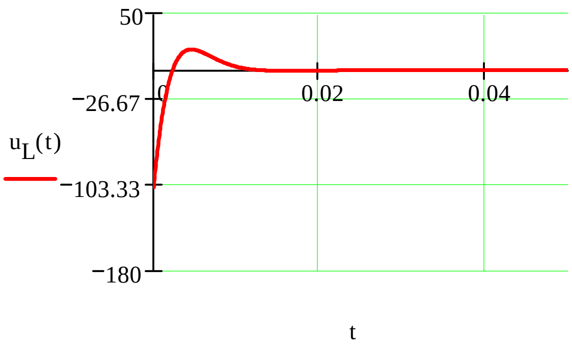
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_L(0) = -105.001$$

$$u_L(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -105.002\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\cos(281.97\cdot t) + 140.676\cdot\exp(-377.78\cdot t)\cdot\sin(281.97\cdot t)$$



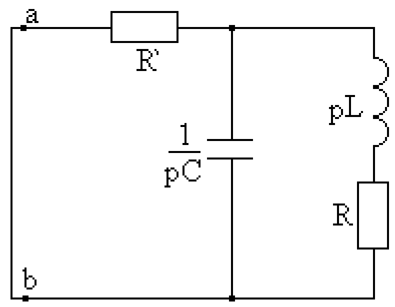
Графік перехідного струму i1(t).





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

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



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

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

$D = 0$

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

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

$R'_1 := 19.231$

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

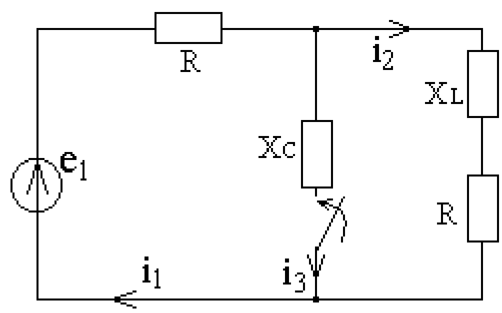
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $\qquad$ $X_C = 83.333$ $\qquad$ $X_L := \omega\cdot L$ $\qquad$ $X_L = 30$

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

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

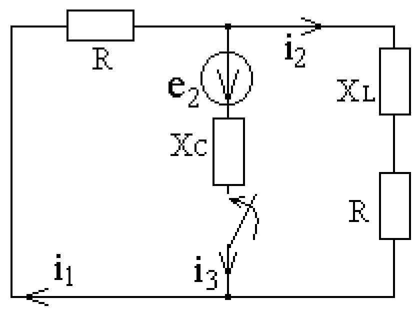


$Z'_{vx} := 2\cdot R + X_L\cdot i$ $\qquad$ $Z'_{vx} = 60 + 30i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad$ $I'_{1дк} = 1.273 + 0.424i$ $\qquad$ $F(I'_{1дк}) = (1.342\ \ 18.435)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}$ $\qquad$ $I'_{2дк} = 1.273 + 0.424i$ $\qquad$ $F(I'_{2дк}) = (1.342\ \ 18.435)$

$I'_{3дк} := 0$



$I''_{2дк} := 0$ $\qquad$ $I''_{2дк} = 0$

$I''_{1дк} := 0$ $\qquad$ $I''_{1дк} = 0$

$I''_{3дк} := 0$ $\qquad$ $I''_{3дк} = 0$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad$ $I_{1дк} = 1.273 + 0.424i$ $\qquad$ $F(I_{1дк}) = (1.342 \quad 18.435)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad$ $I_{2дк} = 1.273 + 0.424i$ $\qquad$ $F(I_{2дк}) = (1.342 \quad 18.435)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad$ $I_{3дк} = 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - I_{1дк} \cdot R$ $\qquad$ $u_{Cдк} = 67.882 + 93.338i$ $\qquad$ $F(u_{Cдк}) = (115.412 \quad 53.973)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad$ $u_{Lдк} = -12.728 + 38.184i$ $\qquad$ $F(u_{Lдк}) = (40.249 \quad 108.435)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 132$

$i_{Lдк}(0) = 0.6$

Given

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

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

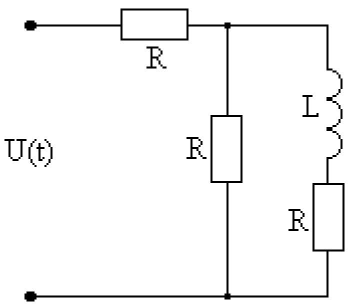
$$-e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0} + u_{L0}$$

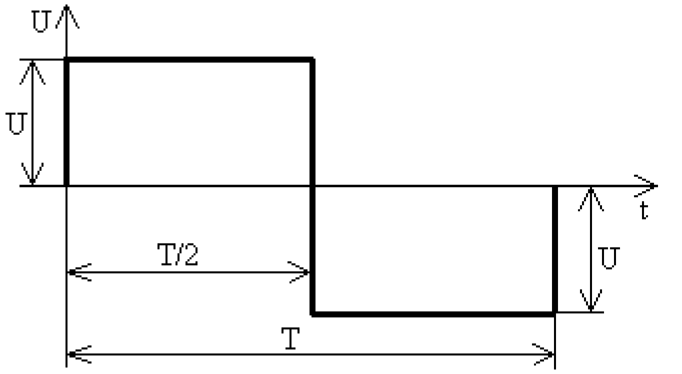
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$$

$i_{10} = 7.4$ $\qquad$ $i_{20} = 0.6$ $\qquad$ $i_{30} = 6.8$ $\qquad$ $u_{L0} = 54$ $\qquad$ $u_{C0} = 132$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{0}{1.5 \cdot R}$ $\qquad i_{1дк} = 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$i_{3дк} := i_{1дк} \cdot \dfrac{R}{R + R}$ $\qquad i_{3дк} = 0$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \cdot \dfrac{R}{R + R}$ $\qquad i_{2дк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E}{1.5 \cdot R}$ $\qquad i'_1 = 0.022$

$i'_3 := i'_1 \cdot \dfrac{R}{R + R}$ $\qquad i'_3 = 0.011$ $\qquad i'_2 := i'_1 \cdot \dfrac{R}{R + R}$ $\qquad i'_2 = 0.011$

$u'_L := 0$

Незалежні початкові умови $\qquad i_{30} := i_{3дк}$ $\qquad i_{30} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

$E = i_{20} \cdot R + i_{10} \cdot R$

$0 = -i_{20} \cdot R + i_{30} \cdot R + u_{L0}$

$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0})$ $\qquad i_{10} = 0.017$ $\qquad i_{20} = 0.017$ $\qquad i_{30} = 0$ $\qquad u_{L0} = 0.5$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$Z_{vx}(p) := R + \dfrac{R \cdot (p \cdot L + R)}{p \cdot L + R + R}$ $\qquad Zvx(p) := \dfrac{R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R)}{p \cdot L + R + R}$

$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \left|\begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix}\right. \rightarrow -300.$ $\qquad T := \dfrac{1}{|p|}$ $\qquad T = 3.333 \times 10^{-3}$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$p = -300$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

$i''_2(t) = B_1 \cdot e^{p \cdot t}$

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1$ $\quad A_1 = -5.556\times 10^{-3}$

$B_1 := i_{30} - i'_3$ $\quad B_1 = -0.011$

Отже вільна складова струму i1(t) та i3(t) будуть мати вигляд:

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

$i''_3(t) := B_1 \cdot e^{p\cdot t}$

Повні значення цих струмів:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ $\quad i_1(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 2.2222\cdot 10^{-2} - 5.5556\cdot 10^{-3}\cdot \exp(-300.\cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ $\quad i_3(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 1.1111\cdot 10^{-2} - 1.1111\cdot 10^{-2}\cdot \exp(-300.\cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t)$ $\quad g_{11}(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 2.2222\cdot 10^{-2} - 5.5556\cdot 10^{-3}\cdot \exp(-300.\cdot t)$

$U_L(t) := L\cdot \frac{d}{dt} i_3(t)$

$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float},5 \ \rightarrow .50000\cdot \exp(-300.\cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1$ $\quad U_0 = 90$

$U_1 := E_1$ $\quad U_1 = 90$ $\quad 0 < t < \frac{T}{2}$

$U_2 := -E_1$ $\quad U_2 = -90$ $\quad \frac{T}{2} < t < T$

$U_3 := 0$ $\quad T < t < \infty$

$U'_1 := 0$ $\quad U'_2 := 0$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t)$

$i_1(t) \ \begin{vmatrix} \text{factor} \\ \text{float},3 \end{vmatrix} \rightarrow 2. - .500\cdot \exp(-300.\cdot t)$

$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1)\cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{2}\right)$

$i_2(t) \ \begin{vmatrix} \text{factor} \\ \text{float},5 \end{vmatrix} \rightarrow -2. - .50000\cdot \exp(-300.\cdot t) + 1.0000\cdot \exp(-300.\cdot t + .50000)$

$i_3(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1)\cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2)\cdot g_{11}(t - T)$

$i_3(t) \ \begin{vmatrix} \text{factor} \\ \text{float},3 \end{vmatrix} \rightarrow -.500\cdot \exp(-300.\cdot t) + 1.00\cdot \exp(-300.\cdot t + .500) - .500\cdot \exp(-300.\cdot t + 1.)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 45.000\cdot \exp(-300.\cdot t)$

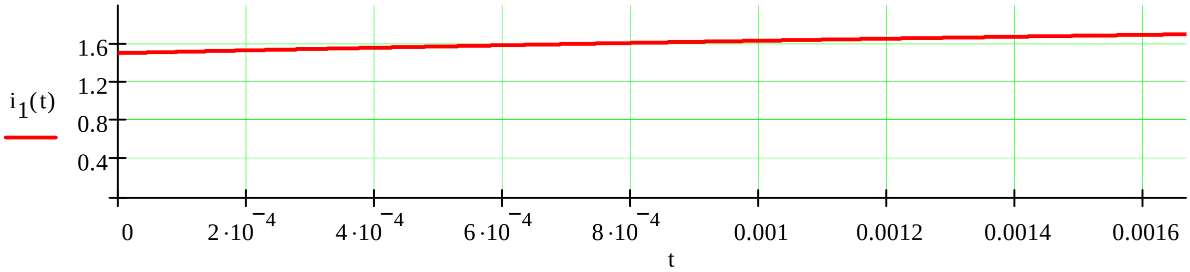
$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1)\cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$

$u_{L2}(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 45.000\cdot \exp(-300.\cdot t) - 90.000\cdot \exp(-300.\cdot t + .50000)$

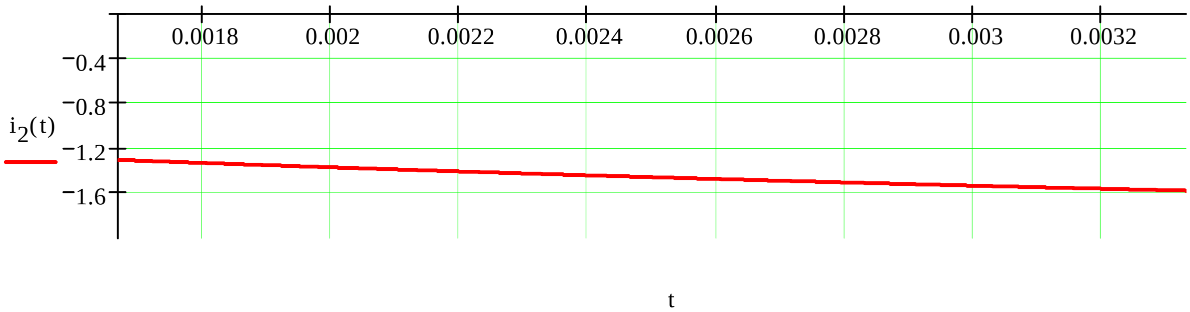
$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1)\cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2)\cdot h_{uL}(t - T)$

$u_{L3}(t) \text{ float},5 \ \rightarrow 45.000\cdot \exp(-300.\cdot t) - 90.000\cdot \exp(-300.\cdot t + .50000) + 45.000\cdot \exp(-300.\cdot t + 1.0000)$

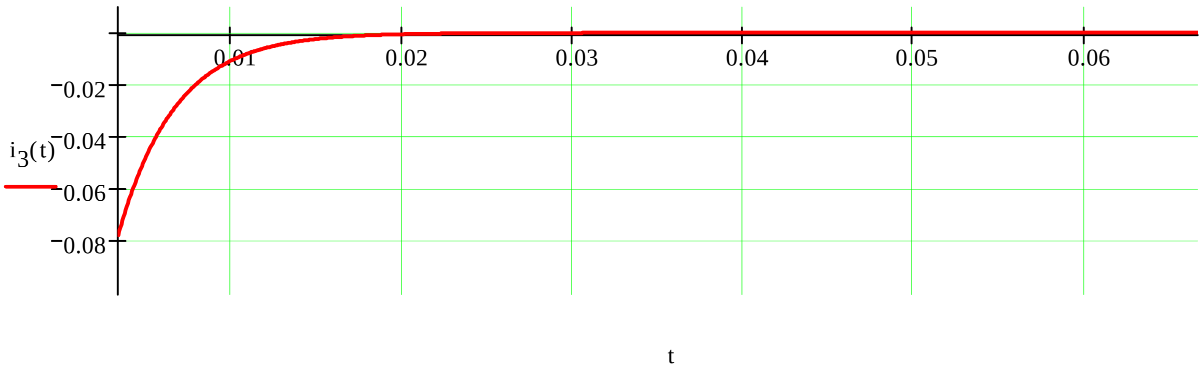
На промежутке от 0 до 1/2T



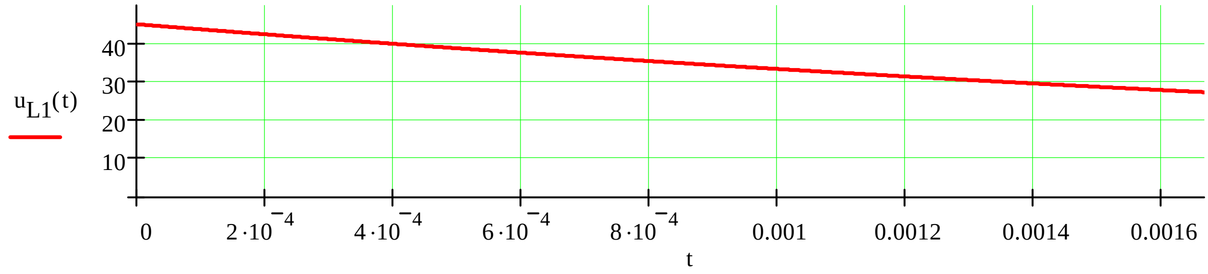
На промежутке от 2/3T до T



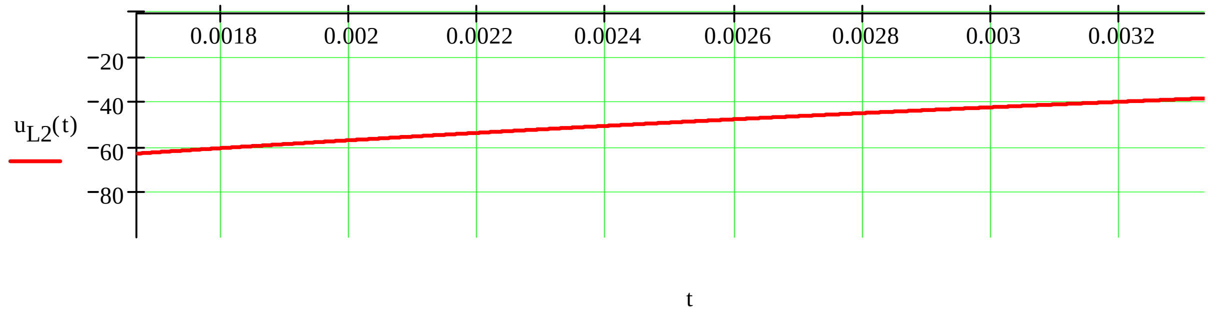
На промежутке от T до 20T



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от 0 до 1/2T



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от 2/3T до T



Графік напруги на реактивному елементі на проміжку: от T до 20T