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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 801

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.

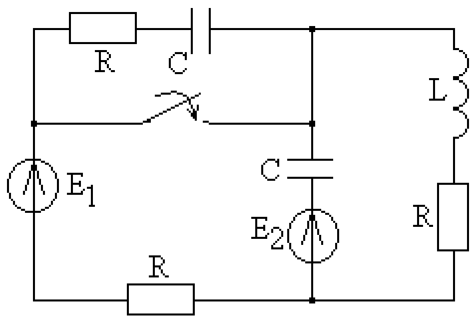
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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 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.



Основна схема

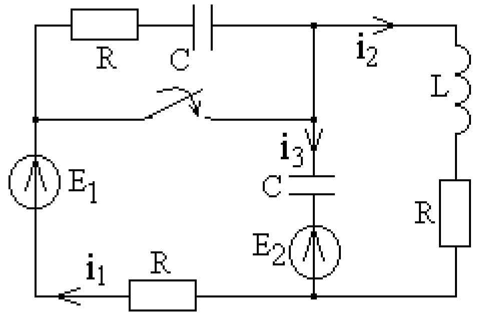
Вхідні данні:

$L := 0.2$ Гн $C := 180\cdot 10^{-6}$ Ф $R := 50$ Ом

$E_1 := 100$ В $E_2 := 80$ В $\psi := 30\cdot deg$ C^0 $\omega := 100$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := E_2$ $\qquad$ $u_{Cдк} = 80$ $\qquad$ $u_{Lдк} := 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2 \cdot R}$ $\qquad$ $i'_2 := i'_1$ $\qquad$ $i'_2 = 1$

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

$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R$ $\qquad$ $u'_C = -30$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\qquad$ $i_{20} = 0$

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\qquad$ $u_{C0} = 80$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \;\rightarrow \begin{pmatrix} -1.200000 \\ -1.200000 \\ 160. \end{pmatrix}$$

$i_{10} = -1.2$ $\quad$ $i_{30} = -1.2$ $\quad$ $u_{L0} = 160$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\qquad$ $di_{20} = 800$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\qquad$ $du_{C0} = -6.667 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = 133.333$ $di_{30} = -666.667$ $du_{L0} = -4.667 \times 10^4$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -180.56 - 151.51 \cdot i \\ -180.56 + 151.51 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -180.56 - 151.51i$ $p_2 = -180.56 + 151.51i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)|$ $\delta = 180.56$ $\omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)|$ $\omega_0 = 151.51$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -2.8060 & 2.8060 \\ .90112 & -2.2405 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -2.806$ $v_1 = 0.901$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow -2.8060 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t + .90112)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 1. - 2.806 \cdot \exp(-180.6 \cdot t) \cdot \sin(151.5 \cdot t + .9011)$$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -4.2090 & 4.2090 \\ 2.9017 & -.23988 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -4.209 \qquad v_2 = 2.902$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -4.2090\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\sin(151.51\cdot t + 2.9017)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 1. - 4.209\cdot\exp(-180.6\cdot t)\cdot\sin(151.5\cdot t + 2.902)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -5.9524 & 5.9524 \\ .20299 & -2.9386 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -5.952 \qquad v_3 = 0.203$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -5.9524\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\sin(151.51\cdot t + .20299)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -5.952\cdot\exp(-180.6\cdot t)\cdot\sin(151.5\cdot t + .2030)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \Big|\begin{matrix}\mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex}\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -140.30 & 140.30 \\ -2.2405 & .90112 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -140.3 \qquad v_C = -2.24$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -140.30\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\sin(151.51\cdot t - 2.2405)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -30. - 140.3\cdot\exp(-180.6\cdot t)\cdot\sin(151.5\cdot t - 2.241)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \Big|\begin{matrix}\mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex}\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -198.41 & 198.41 \\ -.93805 & 2.2035 \end{pmatrix}$

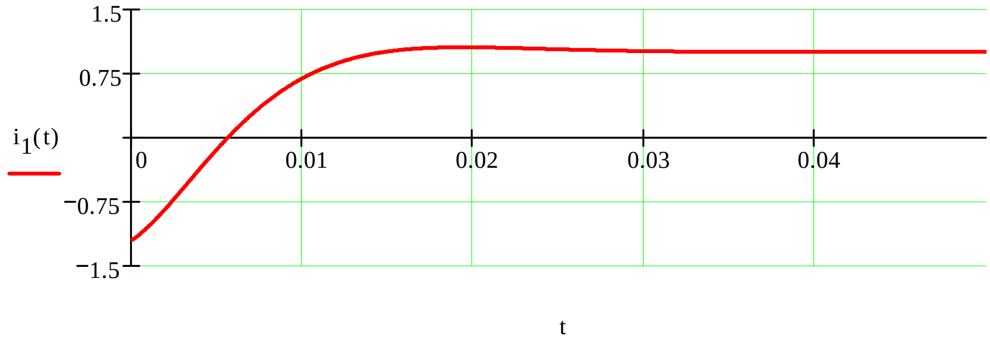
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -198.41 \qquad v_L = -0.938$

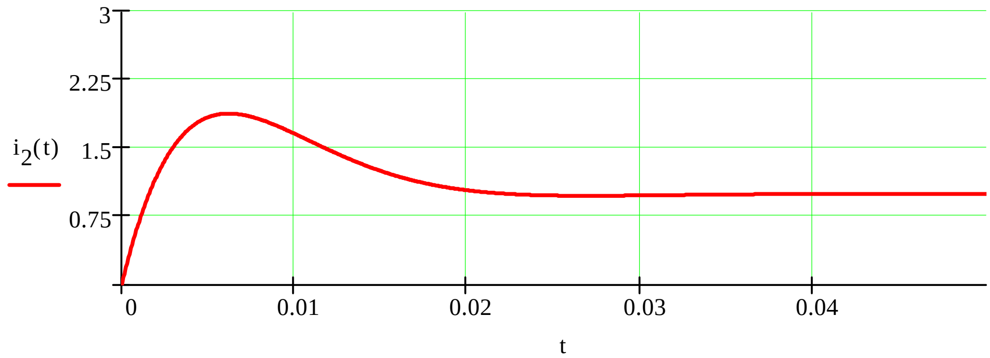
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -198.41\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\sin(151.51\cdot t - .93805)$

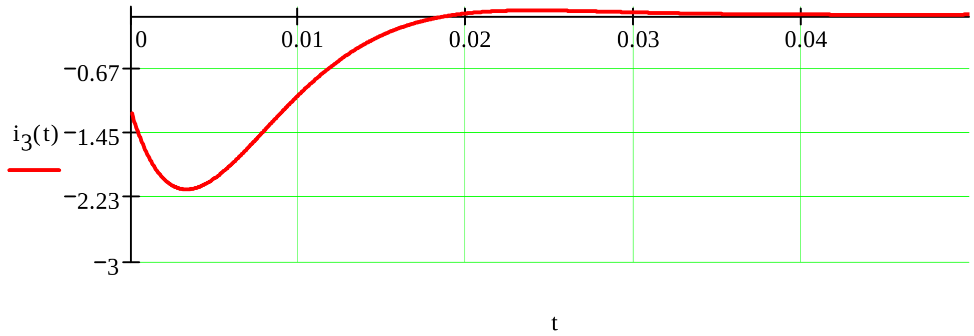
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -198.4\cdot\exp(-180.6\cdot t)\cdot\sin(151.5\cdot t - .9381)$



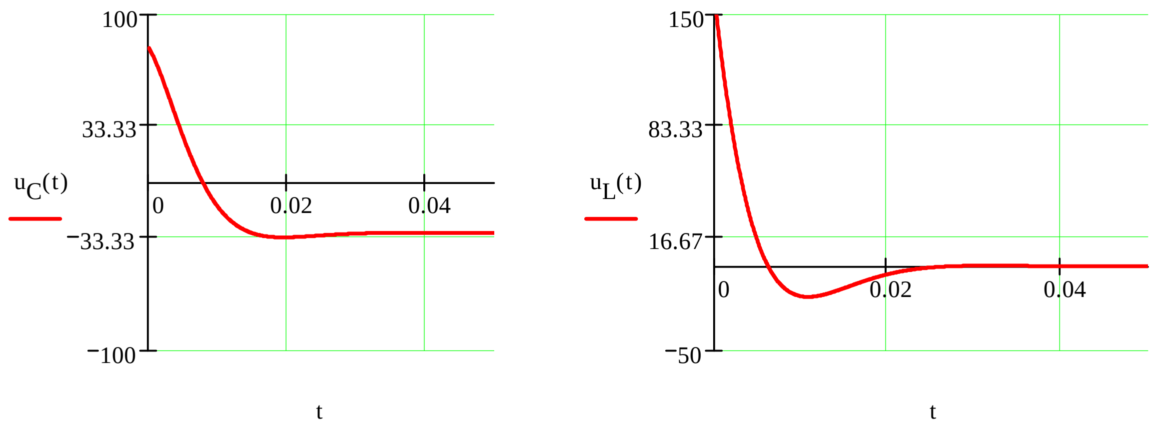
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

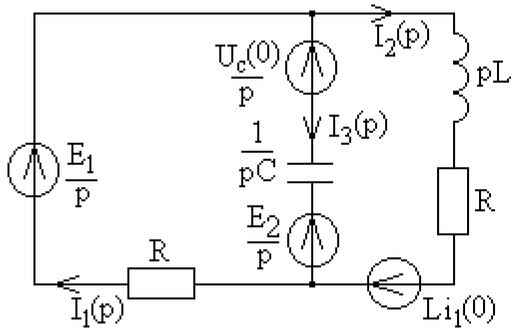


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := 0$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 0$

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := \dfrac{E_2 - E_1}{2} \quad u_{Cдк} = -10 \quad u_{Lдк} := -u_{Cдк} + E_2 \quad u_{Lдк} = 90$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \quad i_{L0} = 0$

$u_{C0} = 80$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}}\cdot\left(3611.1\cdot p + 10.000\cdot p^{2.} + 5.5556\cdot 10^{5}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p)\ \text{float},5\ \rightarrow -1.\cdot\frac{\left(3000.\cdot p + 12.0\cdot p^{2.} - 5.5556\cdot 10^{5}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p)\ \text{float},5\ \rightarrow 888.89\cdot\frac{(9.\cdot p + 625.)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow -1.\cdot\frac{\left(3000.\cdot p + 12.0\cdot p^{2.} - 5.5556\cdot 10^{5}\right)}{p^{1.}\cdot\left(3611.1\cdot p + 10.000\cdot p^{2.} + 5.5556\cdot 10^{5}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float},5\ \rightarrow 888.89\cdot\frac{(9.\cdot p + 625.)}{p^{1.}\cdot\left(3611.1\cdot p + 10.000\cdot p^{2.} + 5.5556\cdot 10^{5}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{-18}{5} \cdot \frac{(2750 + 3 \cdot p)}{\left(500000 + 3250 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor } \rightarrow 80 \cdot \frac{\left(-187500 + 2500 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)}{\left(500000 + 3250 \cdot p + 9 \cdot p^2\right) \cdot p}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_2(p) - L \cdot i_{2дк}$$

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{88889}{50} \cdot \frac{(9 \cdot p + 625)}{\left(36111 \cdot p + 100 \cdot p^2 + 5555600\right)}$$

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

$$N_1(p) := -1 \cdot \left(3000. \cdot p + 12.0 \cdot p^{2.} - 5.5556 \cdot 10^5\right) \qquad M_1(p) := p \cdot \left(3611.1 \cdot p + 10.000 \cdot p^{2.} + 5.5556 \cdot 10^5\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \ \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -180.56 - 151.51 \cdot i \\ -180.56 + 151.51 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -180.56 - 151.51i \qquad p_2 = -180.56 + 151.51i$$

$$N_1(p_0) = 5.556 \times 10^5 \qquad N_1(p_1) = 9.815 \times 10^5 - 2.02i \times 10^5 \qquad N_1(p_2) = 9.815 \times 10^5 + 2.02i \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \ \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 7222.2 \cdot p + 30. \cdot p^{2.} + 5.5556 \cdot 10^5$$

$$dM_1(p_0) = 5.556 \times 10^5 \quad dM_1(p_1) = -4.591 \times 10^5 + 5.472i \times 10^5 \quad dM_1(p_2) = -4.591 \times 10^5 - 5.472i \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \ \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 1.0000 - 2.1998 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \cos(151.51 \cdot t) - 1.74180 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 80 \cdot \left(-187500 + 2500 \cdot p + 9 \cdot p^2\right) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(500000 + 3250 \cdot p + 9 \cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \ \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -180.56 + 151.52 \cdot i \\ -180.56 - 151.52 \cdot i \end{pmatrix} \quad p_0 = 0 \quad p_1 = -180.56 + 151.52i \quad p_2 = -180.56 - 151.52i$$

$$N_u(p_0) = -1.5 \times 10^7 \qquad N_u(p_2) = -4.417 \times 10^7 + 9.092i \times 10^6 \qquad N_u(p_1) = -4.417 \times 10^7 - 9.092i \times 10^6$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 500000 + 6500 \cdot p + 27 \cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 5 \times 10^5 \qquad dM_u(p_1) = -4.133 \times 10^5 - 4.925i \times 10^5 \qquad dM_u(p_2) = -4.133 \times 10^5 + 4.925i \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_C(0) = 79.992$$

$$u_C(t) \ \left|\begin{array}{l}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow -30. + 109.992\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\cos(151.52\cdot t) + 87.074\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\sin(151.52\cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{88889}{50}\cdot(9\cdot p + 625) \qquad M_L(p) := \left(36111\cdot p + 100\cdot p^2 + 5555600\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \ \left|\begin{array}{l}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -180.56 + 151.51\cdot i \\ -180.56 - 151.51\cdot i \end{pmatrix} \qquad p_1 = -180.56 + 151.51i \qquad p_2 = -180.56 - 151.51i$$

$$N_L(p_1) = -1.778\times 10^6 + 2.424i\times 10^6 \qquad N_L(p_2) = -1.778\times 10^6 - 2.424i\times 10^6$$

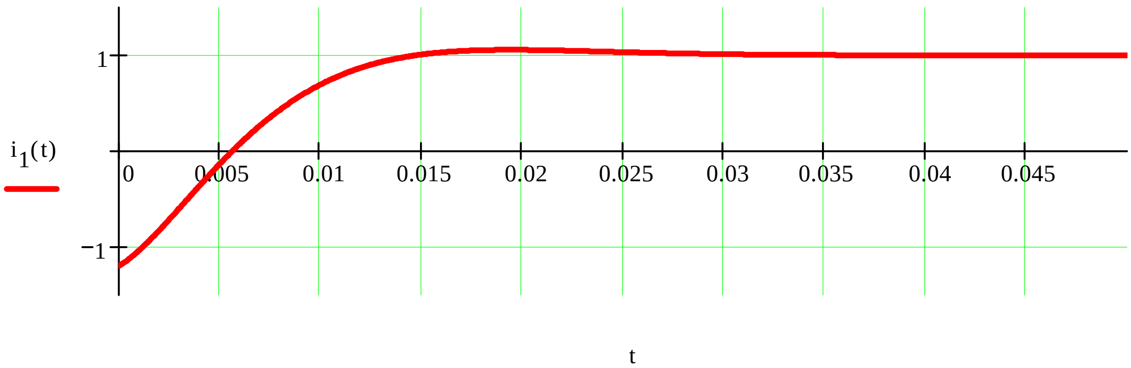
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p) \ \text{factor} \ \rightarrow 36111 + 200\cdot p$$

$$dM_L(p_1) = -1 + 3.03i\times 10^4 \qquad dM_L(p_2) = -1 - 3.03i\times 10^4$$

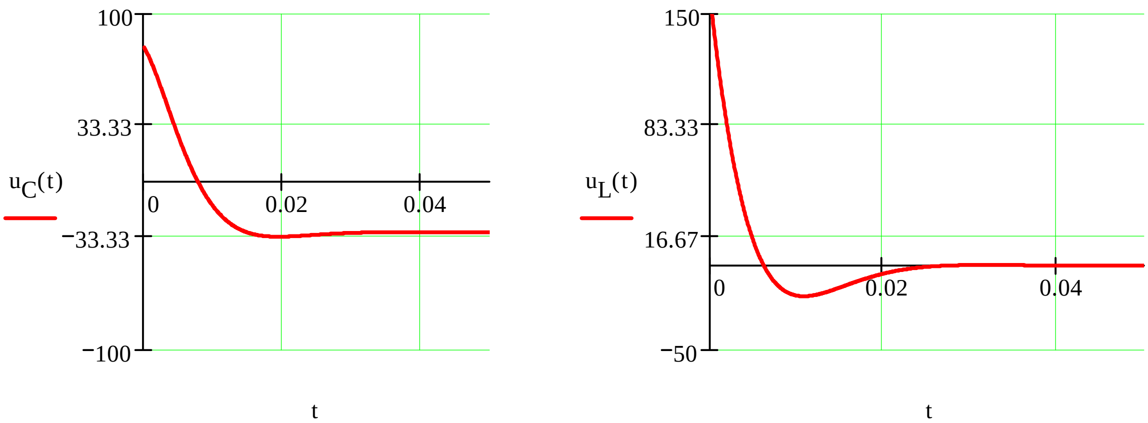
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)}\cdot e^{p_1\cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)}\cdot e^{p_2\cdot t} \qquad u_L(0) = 160.004$$

$$u_L(t) \ \left|\begin{array}{l}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow 160.004\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\cos(151.51\cdot t) - 117.336\cdot\exp(-180.56\cdot t)\cdot\sin(151.51\cdot t)$$



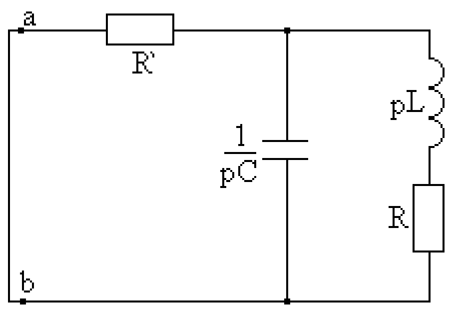
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R\cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4\cdot(R'\cdot L)\cdot\left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix}-66.667 \\ 9.5238\end{pmatrix}$$

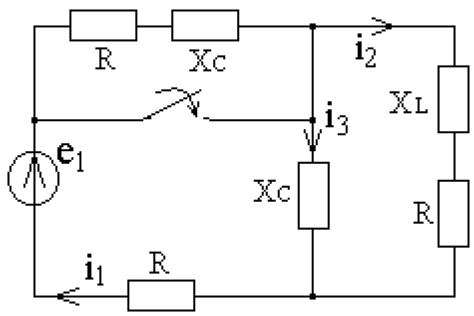
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C} \qquad X_C = 55.556 \qquad X_L := \omega\cdot L \qquad X_L = 20$$

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

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

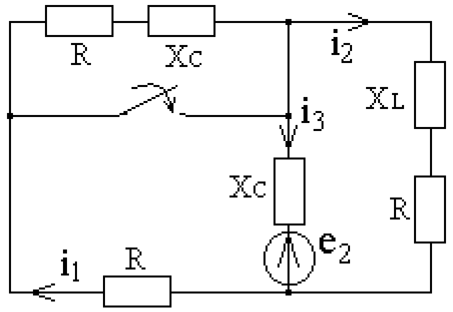


$$Z'_{vx} := 2\cdot R - i\cdot X_C + \frac{(R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 140.997 - 81.958i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.305 + 0.532i \qquad F(I'_{1дк}) = (0.613\ \ 60.168)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.553 + 0.054i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.555\ \ 5.585)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк} \qquad I'_{3дк} = -0.248 + 0.478i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.538\ \ 117.387)$$



$$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (2 \cdot R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C} \qquad Z''_{vx} = 39.737 - 51.322i$$

$$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \qquad I''_{3дк} = 0.166 + 1.221i \qquad F(I''_{3дк}) = (1.233 \quad 82.25)$$

$$I''_{1дк} := I''_{3дк} \cdot \frac{(R + i \cdot X_L)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C} \qquad I''_{1дк} = -0.198 + 0.382i \qquad F(I''_{1дк}) = (0.431 \quad 117.387)$$

$$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк} \qquad I''_{2дк} = 0.364 + 0.839i \qquad F(I''_{2дк}) = (0.915 \quad 66.531)$$

$$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк} \qquad I_{1дк} = 0.107 + 0.914i \qquad F(I_{1дк}) = (0.92 \quad 83.326)$$

$$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк} \qquad I_{2дк} = 0.917 + 0.893i \qquad F(I_{2дк}) = (1.28 \quad 44.245)$$

$$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк} \qquad I_{3дк} = -0.414 - 0.743i \qquad F(I_{3дк}) = (0.851 \quad -119.1)$$

$$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C) \qquad u_{Cдк} = -41.299 + 22.987i \qquad F(u_{Cдк}) = (47.266 \quad 150.9)$$

$$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L \qquad u_{Lдк} = -18.284 + 2.139i \qquad F(u_{Lдк}) = (18.409 \quad 173.326)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 32.509$

$i_{20} = 1.263$

Given

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

$$e_1(0) - e_2(0) = u_{C0} + i_{10} \cdot R$$

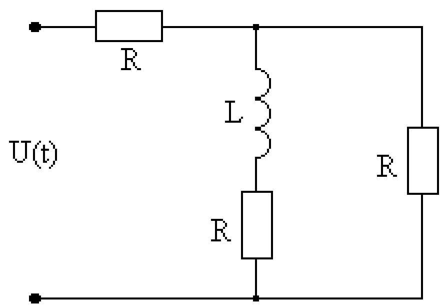
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$$

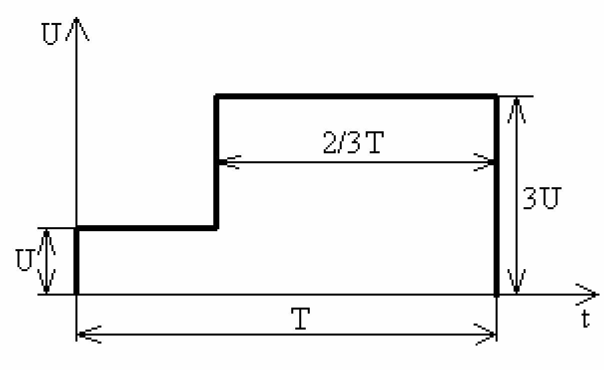
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$$

$i_{10} = -0.367$ $\quad i_{20} = 1.263$ $\quad i_{30} = -1.63$ $\quad u_{L0} = 25.933$ $\quad u_{C0} = 32.509$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1дк} := \frac{0}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \qquad i_{1дк} = 0$$

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

$$u_{Lдк} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \qquad i'_1 = 0.013$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_3 = 6.667 \times 10^{-3} \qquad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_2 = 6.667 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \qquad i_{10} = 0.01 \qquad i_{20} = 0.01 \qquad i_{30} = 0 \qquad u_{L0} = 0.5$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow -375. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 2.667 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -375$$

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:

$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = -3.333 \times 10^{-3}$

$B_1 := i_{30} - i'_3 \qquad B_1 = -6.667 \times 10^{-3}$

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:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad i_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \qquad i_3(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} - 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-375. \cdot t)$

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

$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .50000 \cdot \exp(-375. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 100$

$U_1 := E_1 \qquad U_1 = 100 \qquad 0 < t < \frac{T}{3}$

$U_2 := 3E_1 \qquad U_2 = 300 \qquad \frac{T}{3} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 1.33 - .333 \cdot \exp(-375. \cdot t)$

$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{3}\right)$

$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 4. - .33333 \cdot \exp(-375. \cdot t) - .66667 \cdot \exp(-375. \cdot t + .33333)$

$i_3(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot g_{11}(t - T)$

$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -.333 \cdot \exp(-375. \cdot t) - .667 \cdot \exp(-375. \cdot t + .333) + \exp(-375. \cdot t + 1.)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 50.000 \cdot \exp(-375. \cdot t)$

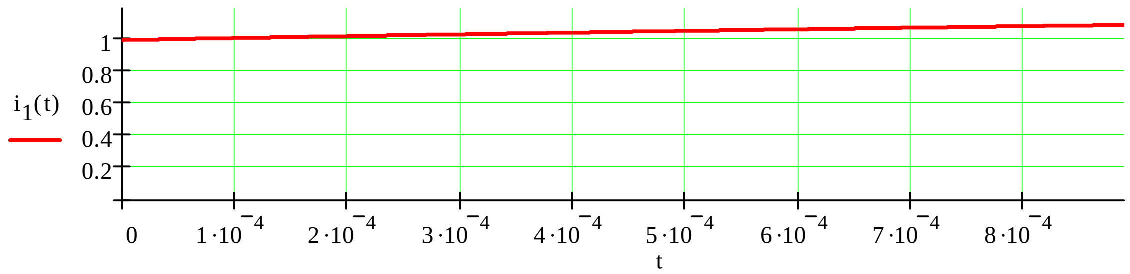
$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{3}\right)$

$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 50.000 \cdot \exp(-375. \cdot t) + 100.00 \cdot \exp(-375. \cdot t + .33333)$

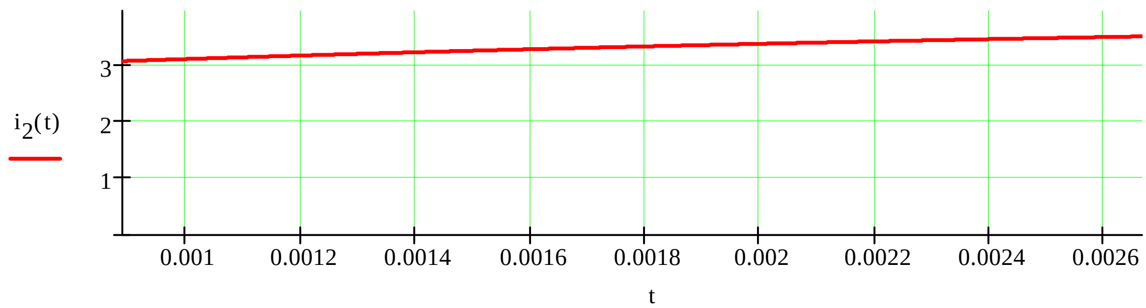
$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$

$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 50.000 \cdot \exp(-375. \cdot t) + 100.00 \cdot \exp(-375. \cdot t + .33333) - 150.00 \cdot \exp(-375. \cdot t + 1.0000)$

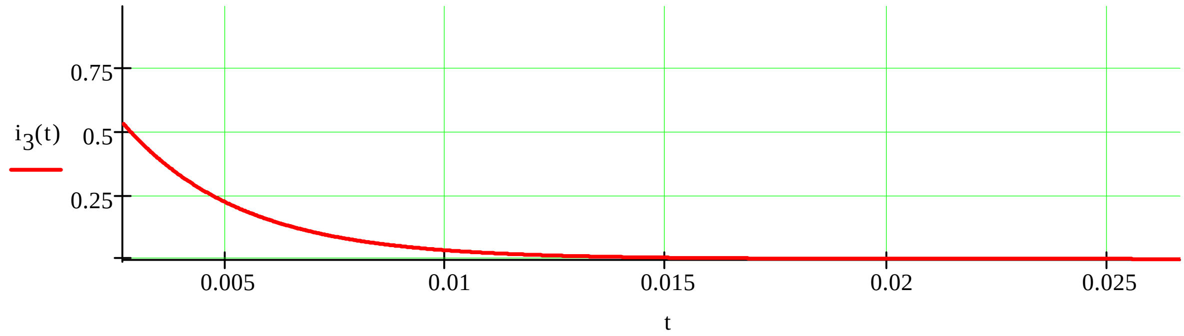
На промежутке от 0 до 1/3T



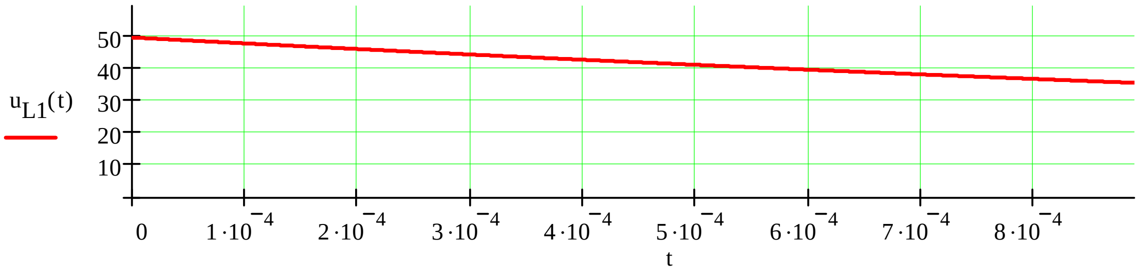
На промежутке от 1/3T до T



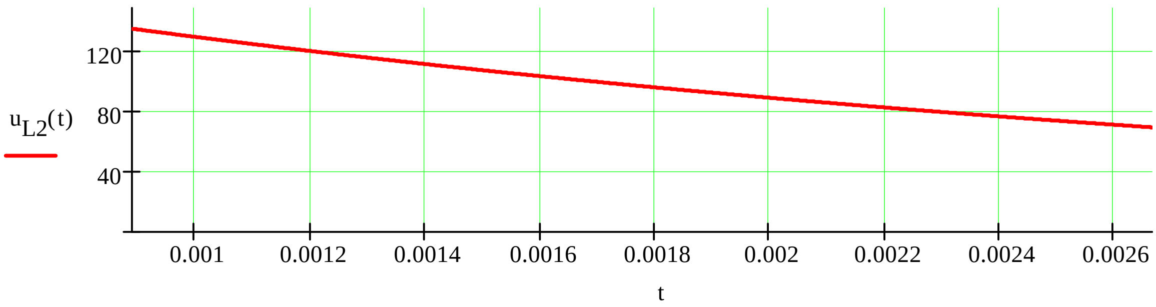
На промежутке от T до 10T



На промежутке от 0 до 1/3T



На промежутке от 1/3T до T



На промежутке от T до 10T