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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 138

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 E1i E2 в колі діють синусоїдні джерела.

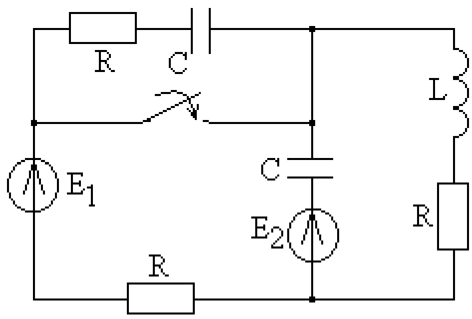
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

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

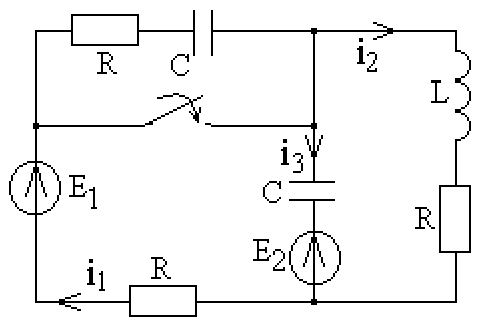
Вхідні данні:

$L := 0.2$ Гн $C := 170\cdot10^{-6}$ Ф $R := 80$ Ом

$E_1 := 110$ В $E_2 := 90$ В $\psi := 180\cdot deg$ C^0 $\omega := 300$ c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2 \quad u_{Cдк} = -90 \quad u_{Lдк} := 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 0.688$

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

$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R \quad u'_C = -35$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк} \quad i_{20} = 0$

$u_{C0} := u_{Cдк} \quad u_{C0} = -90$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})\ \mathrm{float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.375000 \\ 1.375000 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad i_{10} = 1.375 \quad i_{30} = 1.375 \quad u_{L0} = 0$$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L} \quad di_{20} = 0$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = 8.088 \times 10^3$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = -101.103$ $di_{30} = -101.103$ $du_{L0} = 8.088 \times 10^{3}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \left| \begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -236.76 - 52.593 \cdot i \\ -236.76 + 52.593 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -236.76 - 52.593i$ $p_2 = -236.76 + 52.593i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)|$ $\delta = 236.76$ $\omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)|$ $\omega_0 = 52.593$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1) \ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.3593 & 1.3593 \\ -2.6113 & .53030 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -1.359$ $v_1 = -2.611$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow -1.3593 \cdot \exp(-236.76 \cdot t) \cdot \sin(52.593 \cdot t - 2.6113)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \ \mathrm{float}, 4 \ \rightarrow .6875 - 1.359 \cdot \exp(-236.8 \cdot t) \cdot \sin(52.59 \cdot t - 2.611)$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} 3.1704 & -3.1704 \\ -2.9230 & .21859 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = 3.17$ $\qquad v_2 = -2.923$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 3.1704\cdot\exp(-236.76\cdot t)\cdot\sin(52.593\cdot t - 2.9230)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow .6875 + 3.170\cdot\exp(-236.8\cdot t)\cdot\sin(52.59\cdot t - 2.923)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -4.4836 & 4.4836 \\ -2.8299 & .31170 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -4.484$ $\qquad v_3 = -2.83$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -4.4836\cdot\exp(-236.76\cdot t)\cdot\sin(52.593\cdot t - 2.8299)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -4.484\cdot\exp(-236.8\cdot t)\cdot\sin(52.59\cdot t - 2.830)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} -108.74 & 108.74 \\ .53030 & -2.6113 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -108.74$ $\qquad v_C = 0.53$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -108.74\cdot\exp(-236.76\cdot t)\cdot\sin(52.593\cdot t + .53030)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -35. - 108.7\cdot\exp(-236.8\cdot t)\cdot\sin(52.59\cdot t + .5303)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L)\ \left|\begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 153.79 & -153.79 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

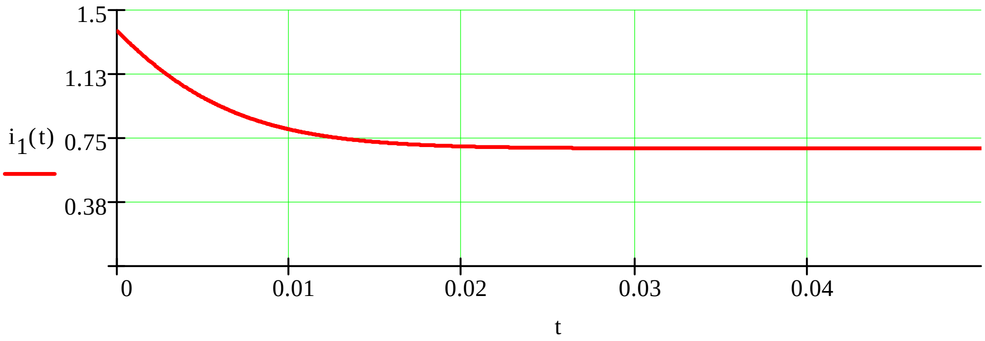
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = 153.79$ $\qquad v_L = 0$

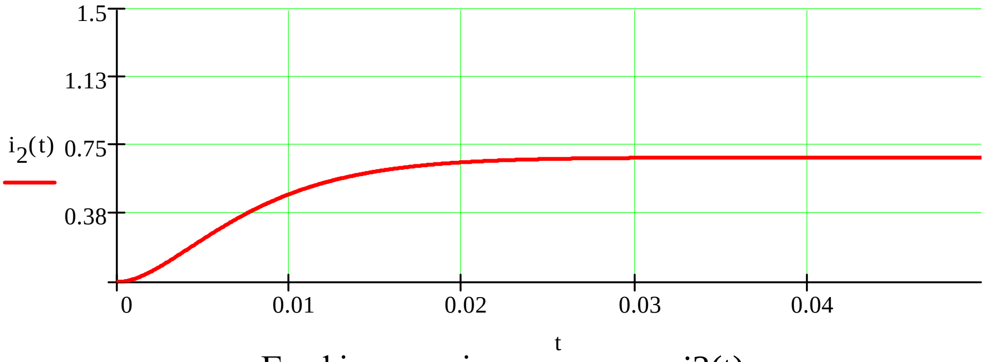
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F\cdot e^{-\delta\cdot t}\cdot\sin(\omega_0\cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow 153.79\cdot\exp(-236.76\cdot t)\cdot\sin(52.593\cdot t)$

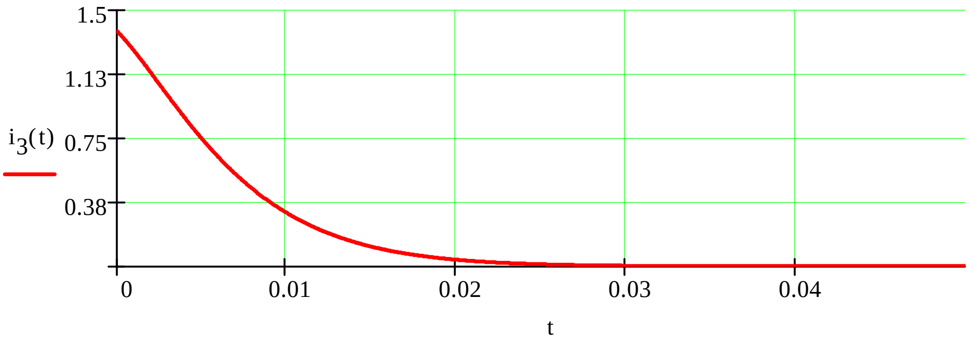
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 153.8\cdot\exp(-236.8\cdot t)\cdot\sin(52.59\cdot t)$



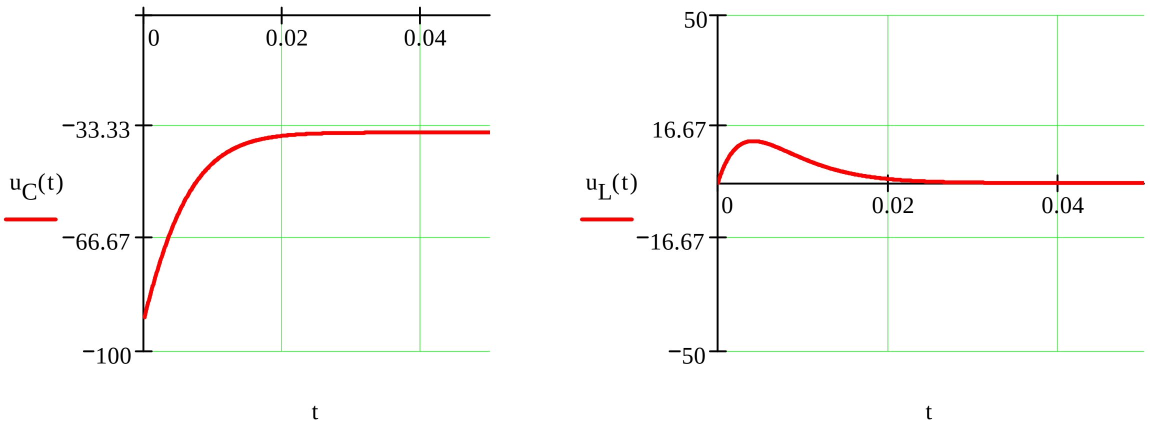
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

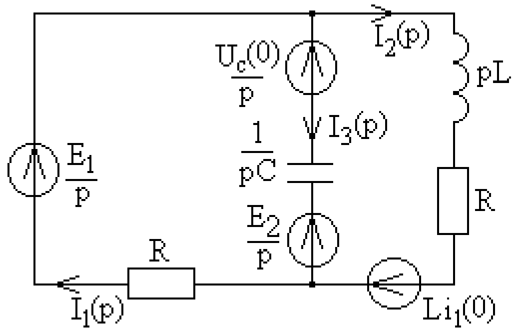


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$

$u_{Cдк} := -E_2 \quad u_{Cдк} = -90 \quad u_{Lдк} := -u_{Cдк} + E_2 \quad u_{Lдк} = 180$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк} \quad i_{L0} = 0$

$u_{C0} = -90$

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

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

$$\Delta(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{1}{p^{1.}}\cdot\left(7576.5\cdot p + 16.000\cdot p^{2.} + 9.4118\cdot 10^{5}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} & p\cdot L + R + \frac{1}{p\cdot C} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{110.}{p^{1.}}\cdot\left(80. + .2\cdot p + \frac{5882.4}{p^{1.}}\right)$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p\cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p\cdot C}\right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} + L\cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p)\ \text{float},5\ \rightarrow \frac{6.4706\cdot 10^{5}}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 44.\cdot\frac{(400.\cdot p + p^2 + 29412.)}{p\cdot(15153.\cdot p + 32.\cdot p^2 + 1882360.)}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p)\ \text{float}, 5 \ \rightarrow \frac{6.4706\cdot 10^5}{p^{1.}\cdot(7576.5\cdot p + 16.000\cdot p^{2.} + 9.4118\cdot 10^5)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{matrix} \rightarrow 4.\cdot\frac{(4400.\cdot p + 11.\cdot p^2 + 2.)}{p\cdot(15153.\cdot p + 32.\cdot p^2 + 1882360.)}$$

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

$$u_L(p)\ \text{factor} \ \rightarrow \frac{258824}{(15153\cdot p + 32\cdot p^2 + 1882360)}$$

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

$$N_1(p) := 44\cdot(400.\cdot p + p^2 + 29412.) \qquad M_1(p) := p^{1.}\cdot(15153.\cdot p + 32.\cdot p^2 + 1882360.)^{1.}$$

$$\begin{pmatrix} p_0\\ p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_1(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0\\ -236.77 - 52.591\cdot i\\ -236.77 + 52.591\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \qquad p_1 = -236.77 - 52.591i \qquad p_2 = -236.77 + 52.591i$$

$$N_1(p_0) = 1.294\times 10^6 \qquad N_1(p_1) = -5.281\times 10^5 + 1.702i\times 10^5 \qquad N_1(p_2) = -5.281\times 10^5 - 1.702i\times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp}M_1(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{factor}\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow 30306.\cdot p + 96.\cdot p^{2.} + 1.8824\cdot 10^6$$

$$dM_1(p_0) = 1.882\times 10^6 \quad dM_1(p_1) = -1.769\times 10^5 + 7.97i\times 10^5 \qquad dM_1(p_2) = -1.769\times 10^5 - 7.97i\times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t)\ \text{float}, 5 \ \rightarrow .68749 + (.34368 + .58633\cdot i)\cdot\exp[(-236.77 - 52.591\cdot i)\cdot t] + (.34368 - .58633\cdot i)\cdot\exp[(-236.77 + 52.5$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 258824 \qquad M_L(p) := 15153\cdot p + 32\cdot p^2 + 1882360$$

$$\begin{pmatrix} p_1\\ p_2\end{pmatrix} := M_L(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -236.77 + 52.592\cdot i\\ -236.77 - 52.592\cdot i\end{pmatrix}$$

$$p_1 = -236.77 + 52.592i \qquad p_2 = -297.98$$

$$N_L(p_1) = 2.588\times 10^5 \qquad N_L(p_2) = 2.588\times 10^5$$

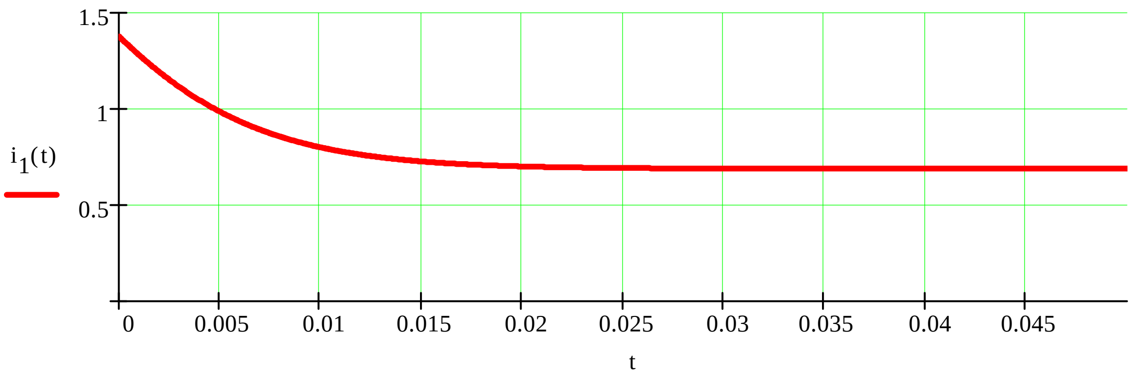
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp}M_L(p)\ \text{factor} \ \rightarrow 15153 + 64\cdot p$$

$$dM_L(p_1) = -0.28 + 3.366i\times 10^3 \qquad dM_L(p_2) = -0.28 - 3.366i\times 10^3$$

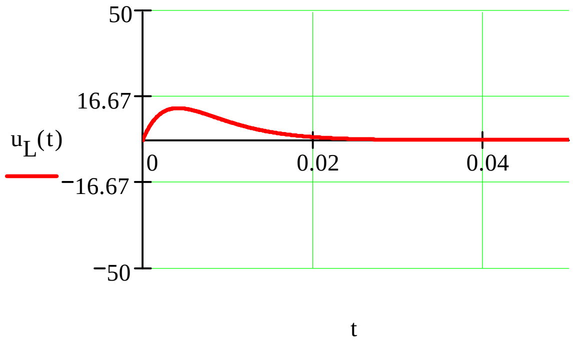
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = -0.013$$

$$u_L(t) \text{ float}, 3 \;\rightarrow\; \left(-6.40 \cdot 10^{-3} - 76.9 \cdot i\right) \cdot \exp[(-237. + 52.6 \cdot i) \cdot t] + \left(-6.40 \cdot 10^{-3} + 76.9 \cdot i\right) \cdot \exp[(-237. - 52.6 \cdot i) \cdot t]$$

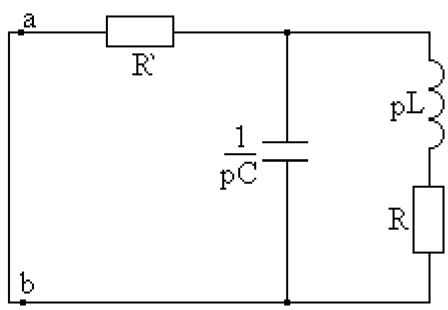


Графік перехідного струму i1(t).



Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС E1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \;\bigg|\; \begin{array}{l} \text{solve}, R' \\ \text{float}, 5 \end{array} \rightarrow \begin{pmatrix} 7.9171 \\ 103.19 \end{pmatrix}$$

$$R'_1 := 2.7030 \qquad R'_2 := 10.340$$

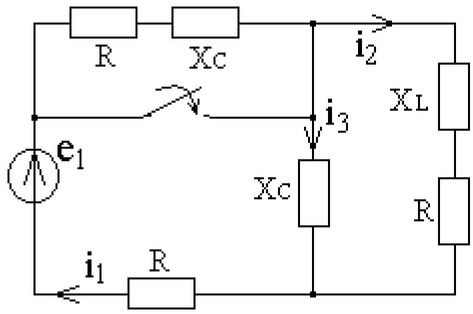
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

$X_C := \frac{1}{\omega\cdot C}$ $\quad X_C = 19.608$ $\quad X_L := \omega\cdot L$ $\quad X_L = 60$

$E_1 := E_1\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\quad E_1 = -110$ $\quad F(E_1) = (110\ \ -180)$

$E_2 := E_2\cdot e^{\psi\cdot i}$ $\quad E_2 = -90$ $\quad F(E_2) = (90\ \ -180)$

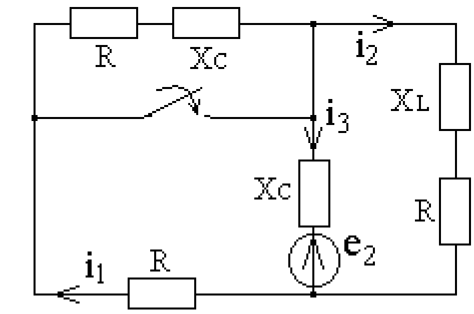


$Z'_{vx} := 2\cdot R - i\cdot X_C + \frac{(R + X_L\cdot i)\cdot(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\quad Z'_{vx} = 163.83 - 41.149i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\quad I'_{1дк} = -0.632 - 0.159i$ $\quad F(I'_{1дк}) = (0.651\ \ -165.901)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}\cdot\frac{(-i\cdot X_C)}{R + X_L\cdot i - i\cdot X_C}$ $\quad I'_{2дк} = 0.031 + 0.139i$ $\quad F(I'_{2дк}) = (0.142\ \ 77.31)$

$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$ $\quad I'_{3дк} = -0.663 - 0.298i$ $\quad F(I'_{3дк}) = (0.727\ \ -155.82)$



$Z''_{vx} := -X_C\cdot i + \frac{(R + i\cdot X_L)\cdot(2\cdot R - i\cdot X_C)}{R + i\cdot X_L + R + R - i\cdot X_C}$ $\quad Z''_{vx} = 62.108 + 3.403i$

$I''_{3дк} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\quad I''_{3дк} = -1.445 + 0.079i$ $\quad F(I''_{3дк}) = (1.447\ \ 176.863)$

$I''_{1дк} := I''_{3дк}\cdot\frac{(R + i\cdot X_L)}{R + i\cdot X_L + R + R - i\cdot X_C}$ $\quad I''_{1дк} = -0.542 - 0.244i$ $\quad F(I''_{1дк}) = (0.595\ \ -155.82)$

$I''_{2дк} := I''_{3дк} - I''_{1дк}$ $\quad I''_{2дк} = -0.902 + 0.323i$ $\quad F(I''_{2дк}) = (0.958\ \ 160.323)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\quad I_{1дк} = -1.174 - 0.402i$ $\quad F(I_{1дк}) = (1.241 \quad -161.09)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\quad I_{2дк} = -0.871 + 0.462i$ $\quad F(I_{2дк}) = (0.986 \quad 152.076)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\quad I_{3дк} = 0.782 - 0.377i$ $\quad F(I_{3дк}) = (0.868 \quad -25.731)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\quad u_{Cдк} = -7.388 - 15.331i$ $\quad F(u_{Cдк}) = (17.018 \quad -115.731)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\quad u_{Lдк} = 24.129 - 70.437i$ $\quad F(u_{Lдк}) = (74.455 \quad -71.09)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = -21.681$

$i_{20} = 0.653$

Given

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

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

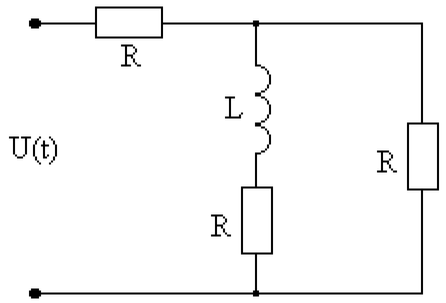
$$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$$

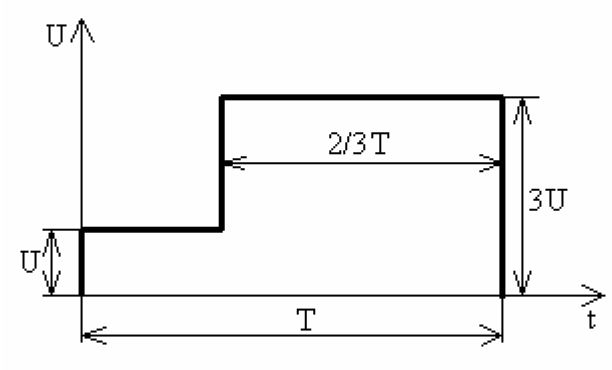
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$$

$i_{10} = 0.271$ $\quad i_{20} = 0.653$ $\quad i_{30} = -0.382$ $\quad u_{L0} = -73.914$ $\quad u_{C0} = -21.681$

Інтеграл Дюамеля

$T := 0.8$ $\qquad E_1 := 110$ $\qquad E := 1$





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: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \qquad i'_1 = 8.333 \times 10^{-3}$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_3 = 4.167 \times 10^{-3} \qquad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_2 = 4.167 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \qquad i_{10} = 6.25 \times 10^{-3} \quad i_{20} = 6.25 \times 10^{-3} \qquad i_{30} = 0 \qquad u_{L0} = 0.5$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \;\Big|\; \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -600. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 1.333 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -600$$

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:

$A_1 := i_{10} - i'_1 \qquad A_1 = -2.083 \times 10^{-3}$

$B_1 := i_{30} - i'_3 \qquad B_1 = -4.167 \times 10^{-3}$

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:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \qquad i_1(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 8.3333 \cdot 10^{-3} - 2.0833 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-600. \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \qquad i_3(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 4.1667 \cdot 10^{-3} - 4.1667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-600. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t) \qquad g_{11}(t)\ \text{float},5\ \rightarrow 8.3333 \cdot 10^{-3} - 2.0833 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-600. \cdot t)$

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

$h_{uL}(t) := U_L(t)\ \text{float},5\ \rightarrow .50000 \cdot \exp(-600. \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := E_1 \qquad U_0 = 110$

$U_1 := E_1 \qquad U_1 = 110 \qquad 0 < t < \frac{T}{3}$

$U_2 := 3E_1 \qquad U_2 = 330 \qquad \frac{T}{3} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$i_1(t)\ \left|\begin{array}{l}\text{factor}\\ \text{float},3\end{array}\right. \rightarrow .917 - .229 \cdot \exp(-600. \cdot t)$

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

$i_2(t)\ \left|\begin{array}{l}\text{factor}\\ \text{float},5\end{array}\right. \rightarrow 2.7500 - .22917 \cdot \exp(-600. \cdot t) - .45833 \cdot \exp(-600. \cdot t + .26667)$

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

$i_3(t)\ \left|\begin{array}{l}\text{factor}\\ \text{float},3\end{array}\right. \rightarrow -.229 \cdot \exp(-600. \cdot t) - .458 \cdot \exp(-600. \cdot t + .267) + .688 \cdot \exp(-600. \cdot t + .800)$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 55.000 \cdot \exp(-600. \cdot t)$$

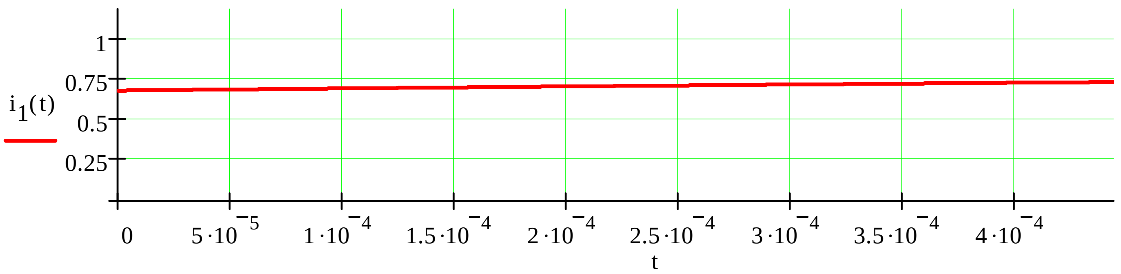
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{3}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 55.000 \cdot \exp(-600. \cdot t) + 110.00 \cdot \exp(-600. \cdot t + .26667)$$

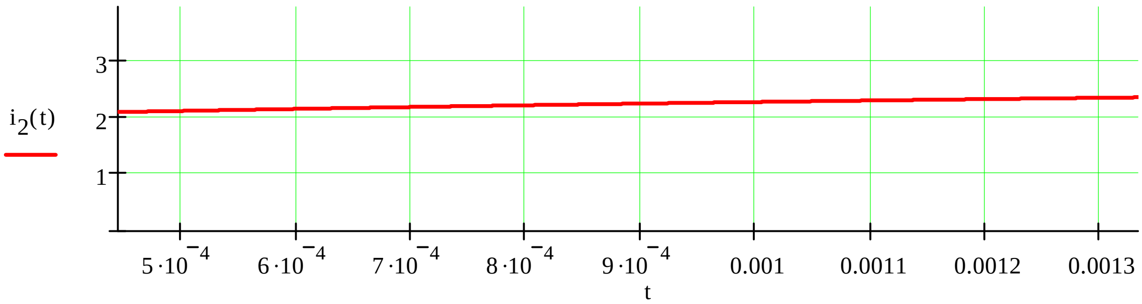
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{3}\right) + \left(U_3 - U_2\right) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 55.000 \cdot \exp(-600. \cdot t) + 110.00 \cdot \exp(-600. \cdot t + .26667) - 165.00 \cdot \exp(-600. \cdot t + .80000)$$

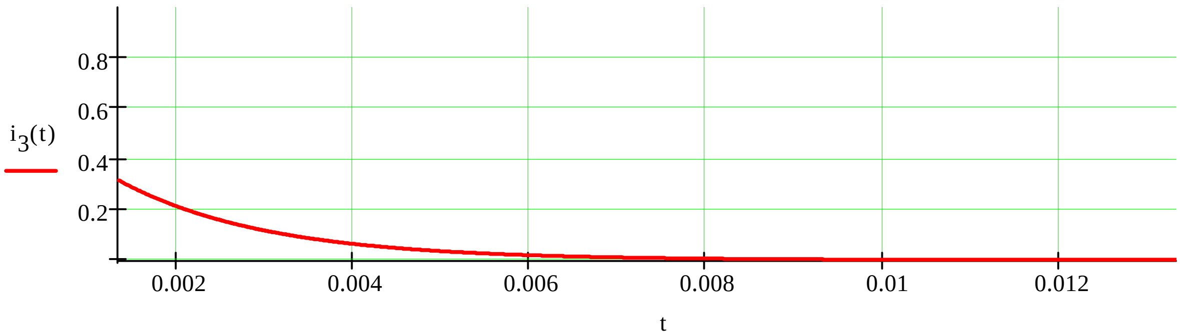
На промежутке от 0 до 1/3T



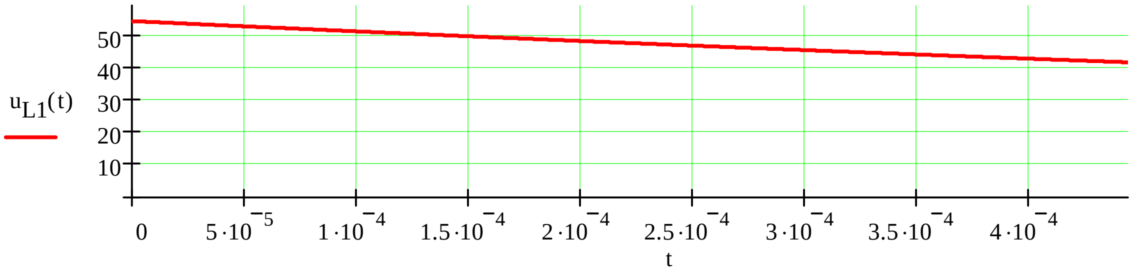
На промежутке от 1/3T до T



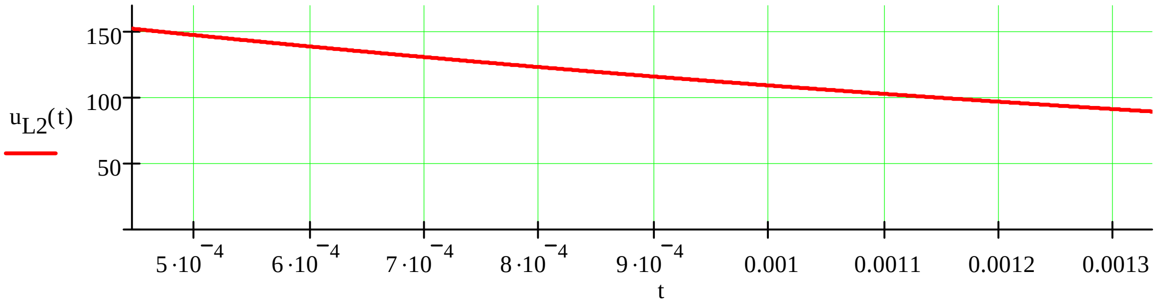
На промежутке от T до 10T



На промежутке от 0 до 1/3T



На промежутке от 1/3T до T



На промежутке от T до 10T