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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 609

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.

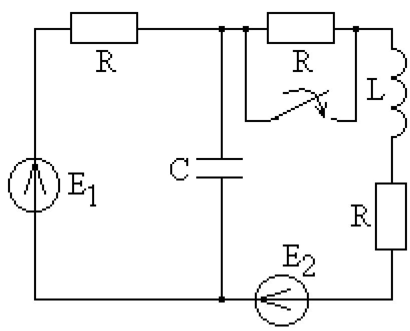
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС Е2.

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.



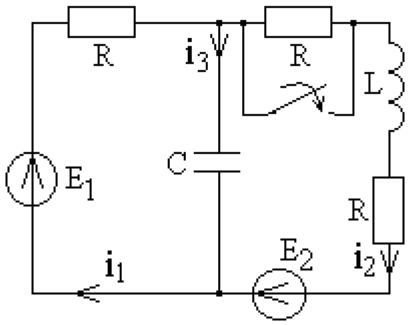
Вхідні данні:

$L := 0.125$ Гн $\quad C := 70 \cdot 10^{-6}$ Ф $\quad R := 40$ Ом

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

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1 + E_2}{3 \cdot R}$ $\qquad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.5$

$i_{3дк} := 0$ $\qquad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 40$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \dfrac{E_1 + E_2}{2 \cdot R}$ $\qquad i'_2 := i'_1$ $\qquad i'_2 = 2.25$

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

$u'_C := E_1 - i'_1 \cdot R$ $\qquad u'_C = 10$

Незалежні початкові умови

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

$u_{C0} := u_{Cдк}$ $\qquad u_{C0} = 40$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})\ \mathrm{float}, 5 \ \rightarrow \begin{pmatrix} 1.5000 \\ 0 \\ 60. \end{pmatrix}$$

$i_{30} = 0$ $\qquad i_{10} = 1.5$ $\qquad u_{L0} = 60$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \dfrac{u_{L0}}{L}$ $\qquad di_{20} = 480$

$du_{C0} := \dfrac{i_{30}}{C}$ $\qquad du_{C0} = 0$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0})$ $\quad di_{10} = 0 \quad di_{30} = -480 \quad du_{L0} = -1.92 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \dfrac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \dfrac{1}{p \cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -338.57 - 337.55 \cdot i \\ -338.57 + 337.55 \cdot i \end{pmatrix}$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -338.57 - 337.55i \qquad p_2 = -338.57 + 337.55i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)| \quad \delta = 338.57 \qquad \omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)| \quad \omega_0 = 337.55$

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

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

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

$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1)\ \mathrm{float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0623 & -1.0623 \\ -2.3577 & .78389 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = 1.062 \qquad v_1 = -2.358$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1)\ \mathrm{float}, 5 \rightarrow 1.0623 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t - 2.3577)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)\ \mathrm{float}, 4 \rightarrow 2.250 + 1.062 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t - 2.358)$

Для струму i2(t):

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

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

$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.0055 & 1.0055 \\ 2.2997 & -.84187 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -1.006$ $v_2 = 2.3$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -1.0055 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t + 2.2997)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 2.250 - 1.006 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t + 2.300)$

Для струму i3(t):

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

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

$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -1.4220 & 1.4220 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -1.422$ $v_3 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -1.4220 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -1.422 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C) \left| \begin{array}{l} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -42.491 & 42.491 \\ -2.3577 & .78389 \end{pmatrix}$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -42.491$ $v_C = -2.358$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -42.491 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t - 2.3577)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 10. - 42.49 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t - 2.358)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L) \left| \begin{array}{l} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -60.091 & 60.091 \\ -1.6258 & 1.5158 \end{pmatrix}$

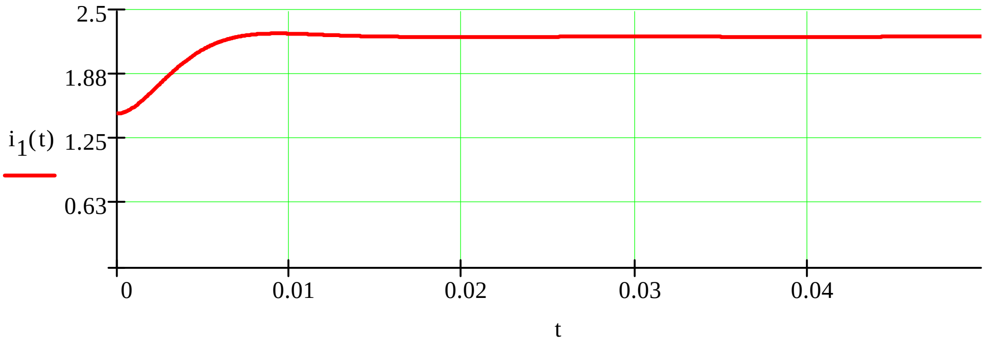
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -60.091$ $v_L = -1.626$

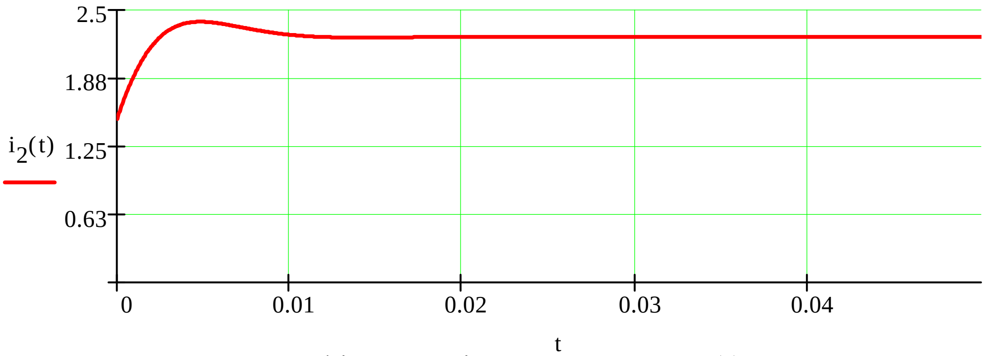
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -60.091 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.55 \cdot t - 1.6258)$

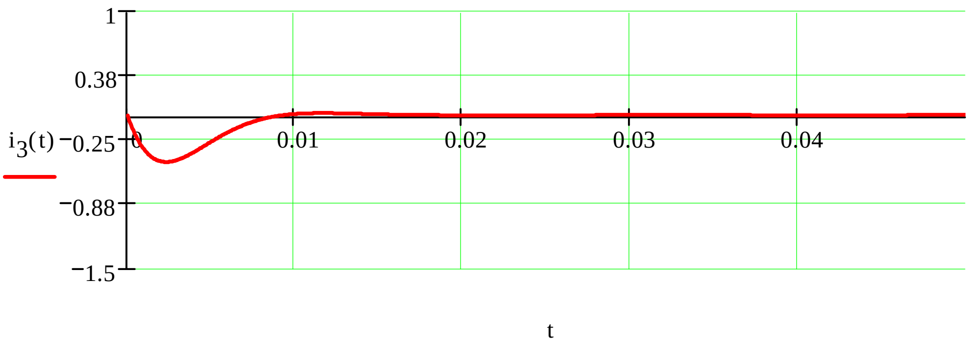
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -60.09 \cdot \exp(-338.6 \cdot t) \cdot \sin(337.6 \cdot t - 1.626)$



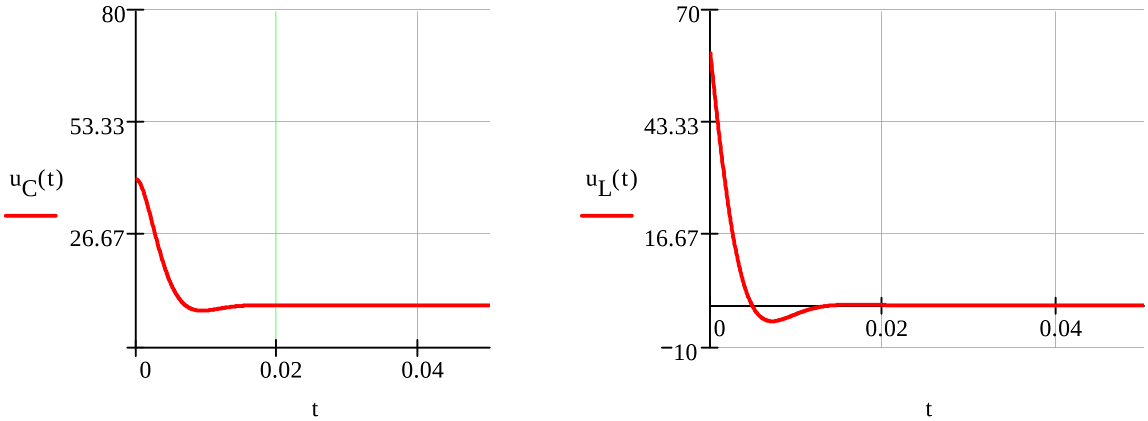
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

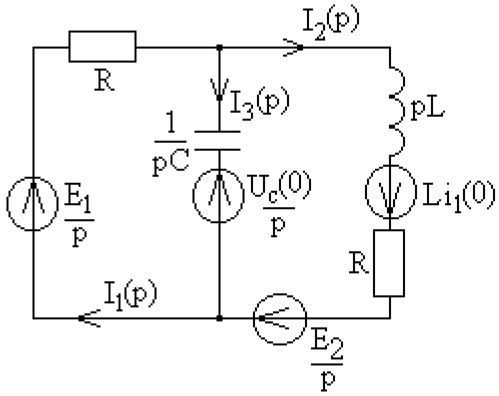


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$i_{1дк} := \dfrac{E_1 + E_2}{3 \cdot R}$ $\quad i_{2дк} := i_{1дк} \quad i_{2дк} = 1.5$

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 40$

Початкові умови:

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

$u_{C0} = 40$

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

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

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + \dfrac{1}{p \cdot C} & -\left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) & \dfrac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{vmatrix} \qquad \Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{1}{p^{1.}} \cdot \left(3385.7 \cdot p + 1.1429 \cdot 10^{6} + 5.0000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \dfrac{E_1}{p} - \dfrac{u_{C0}}{p} & -\left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) \\ \dfrac{E_2}{p} + \dfrac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \dfrac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{vmatrix} \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(5078.6 \cdot p + 2.5714 \cdot 10^{6} + 7.500 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + \dfrac{1}{p \cdot C} & \dfrac{E_1}{p} - \dfrac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\dfrac{1}{p \cdot C}\right) & \dfrac{E_2}{p} + \dfrac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{vmatrix} \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(7478.6 \cdot p + 7.5000 \cdot p^{2.} + 2.5714 \cdot 10^{6}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(5078.6 \cdot p + 2.5714 \cdot 10^{6} + 7.500 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(3385.7 \cdot p + 1.1429 \cdot 10^{6} + 5.0000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{\left(7478.6 \cdot p + 7.5000 \cdot p^{2.} + 2.5714 \cdot 10^{6}\right)}{p^{1.} \cdot \left(3385.7 \cdot p + 1.1429 \cdot 10^{6} + 5.0000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

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

$$u_C(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{factor}\end{matrix} \rightarrow 40 \cdot \frac{\left(33857 \cdot p + 2857400 + 50 \cdot p^2\right)}{p \cdot \left(33857 \cdot p + 11429000 + 50 \cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_{k2}(p) - L \cdot i_{2дк}$$

$$u_L(p) \text{ factor } \rightarrow 60 \cdot \frac{(7 \cdot p + 2500)}{\left(1600000 + 4740 \cdot p + 7 \cdot p^2\right)}$$

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

$$N_1(p) := \left(5078.6 \cdot p + 2.5714 \cdot 10^6 + 7.500 \cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p \cdot \left(3385.7 \cdot p + 1.1429 \cdot 10^6 + 5.0000 \cdot p^{2.}\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -338.57 - 337.57 \cdot i \\ -338.57 + 337.57 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -338.57 - 337.57i \qquad p_2 = -338.57 + 337.57i$

$N_1(p_0) = 2.571 \times 10^6 \qquad N_1(p_1) = 8.57 \times 10^5 - 16.879i \qquad N_1(p_2) = 8.57 \times 10^5 + 16.879i$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor } \rightarrow \frac{33857}{5} \cdot p + 1142900 + 15 \cdot p^2$$

$dM_1(p_0) = 1.143 \times 10^6 \qquad dM_1(p_1) = -1.14 \times 10^6 + 1.143i \times 10^6 \qquad dM_1(p_2) = -1.14 \times 10^6 - 1.143i \times 10^6$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 1.5$$

$$i_1(t) \;\Big|\begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 2.2499 - .74986 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \cos(337.57 \cdot t) - .75204 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.57 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := 40 \cdot \left(33857 \cdot p + 2857400 + 50 \cdot p^2\right) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(33857 \cdot p + 11429000 + 50 \cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \;\Big|\begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -338.57 + 337.57 \cdot i \\ -338.57 - 337.57 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -338.57 + 337.57i \qquad p_2 = -338.57 - 337.57i$

$N_u(p_0) = 1.143 \times 10^8 \qquad N_u(p_1) = -3.429 \times 10^8 \qquad N_u(p_2) = -3.429 \times 10^8$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 67714 \cdot p + 11429000 + 150 \cdot p^2$$

$dM_u(p_0) = 1.143 \times 10^7 \qquad dM_u(p_1) = -1.14 \times 10^7 - 1.143i \times 10^7 \qquad dM_u(p_2) = -1.14 \times 10^7 + 1.143i \times 10^7$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_C(0) = 40$$

$$u_C(t) \;\Big|\; \begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 10.001 + 30.000 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \cos(337.57 \cdot t) + 30.088 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.57 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 60 \cdot (7 \cdot p + 2500) \qquad M_L(p) := \left(1600000 + 4740 \cdot p + 7 \cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \;\Big|\; \begin{matrix}\text{solve}, p\\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -338.57 + 337.56 \cdot i \\ -338.57 - 337.56 \cdot i \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -338.57 + 337.56i \qquad p_2 = -338.57 - 337.56i$$

$$N_L(p_1) = 7.801 \times 10^3 + 1.418i \times 10^5 \qquad N_L(p_2) = 7.801 \times 10^3 - 1.418i \times 10^5$$

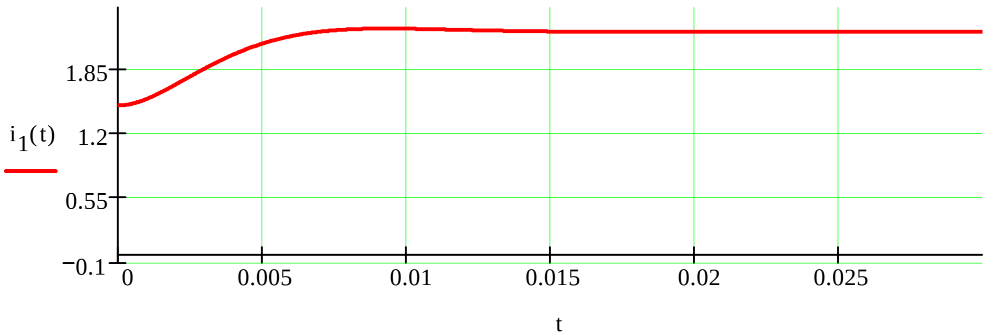
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 4740 + 14 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 0.02 + 4.726i \times 10^3 \qquad dM_L(p_2) = 0.02 - 4.726i \times 10^3$$

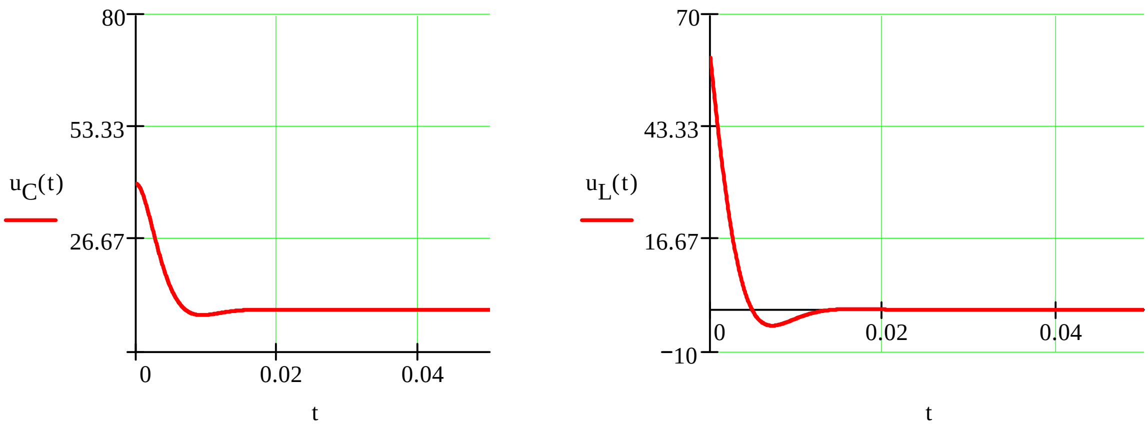
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = 60$$

$$u_L(t) \;\Big|\; \begin{matrix}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{matrix} \rightarrow 60.000 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \cos(337.56 \cdot t) + 3.3010 \cdot \exp(-338.57 \cdot t) \cdot \sin(337.56 \cdot t)$$



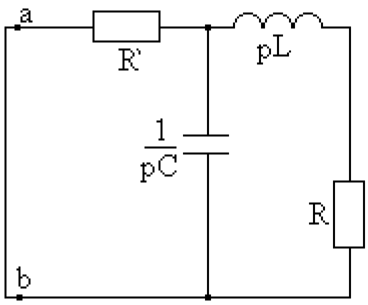
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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



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

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|\begin{matrix}\text{solve}, R' \\ \text{float}, 5\end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -40.115 \\ 14.341 \end{pmatrix}$$

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

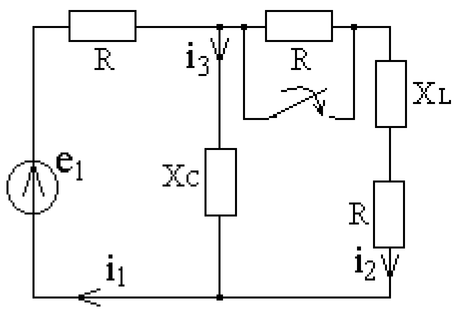
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоідної напруги:

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad X_C = 142.857 \qquad X_L := \omega \cdot L \qquad X_L = 12.5$$

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

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

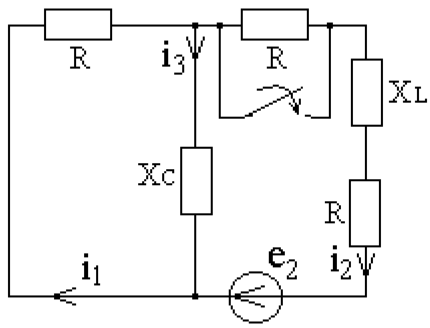


$$Z'_{vx} := R + \frac{(2R + X_L \cdot i) \cdot (-i \cdot X_C)}{2R + X_L \cdot i - i \cdot X_C} \qquad Z'_{vx} = 109.792 - 29.133i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}} \qquad I'_{1дк} = 0.624 + 0.621i \qquad F(I'_{1дк}) = (0.88 \;\; 44.861)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{(-i \cdot X_C)}{2R + X_L \cdot i - i \cdot X_C} \qquad I'_{2дк} = 0.8 + 0.189i \qquad F(I'_{2дк}) = (0.822 \;\; 13.323)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{2R + X_L \cdot i}{2R + X_L \cdot i - i \cdot X_C} \qquad I'_{3дк} = -0.176 + 0.431i \qquad F(I'_{3дк}) = (0.466 \;\; 112.204)$$



$Z''_{vx} := 2R + X_L \cdot i + \dfrac{R \cdot (-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C}$ $\qquad Z''_{vx} = 117.092 + 2.114i$

$I''_{2дк} := \dfrac{E_2}{Z''_{vx}}$ $\qquad I''_{2дк} = 0.598 + 0.331i$ $\qquad F(I''_{2дк}) = (0.683 \;\; 28.966)$

$I''_{1дк} := I''_{2дк} \cdot \dfrac{(-i \cdot X_C)}{R - i \cdot X_C}$ $\qquad I''_{1дк} = 0.64 + 0.152i$ $\qquad F(I''_{1дк}) = (0.658 \;\; 13.323)$

$I''_{3дк} := I''_{2дк} \cdot \dfrac{R}{R - i \cdot X_C}$ $\qquad I''_{3дк} = -0.042 + 0.179i$ $\qquad F(I''_{3дк}) = (0.184 \;\; 103.323)$

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = 1.264 + 0.773i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (1.482 \;\; 31.431)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = 1.398 + 0.52i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (1.491 \;\; 20.417)$

$I_{3дк} := I'_{3дк} - I''_{3дк}$ $\qquad I_{3дк} = -0.134 + 0.252i$ $\qquad F(I_{3дк}) = (0.285 \;\; 117.92)$

$u_{Cдк} := I_{3дк} \cdot (-i \cdot X_C)$ $\qquad u_{Cдк} = 36.038 + 19.097i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (40.785 \;\; 27.92)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -9.657 + 15.801i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (18.519 \;\; 121.431)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 27.007$

$i_{Lдк}(0) = 0.736$

Given

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

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

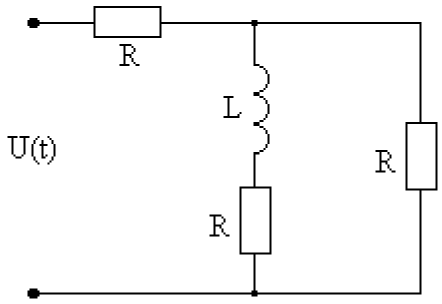
$e_2(0) = i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0}$

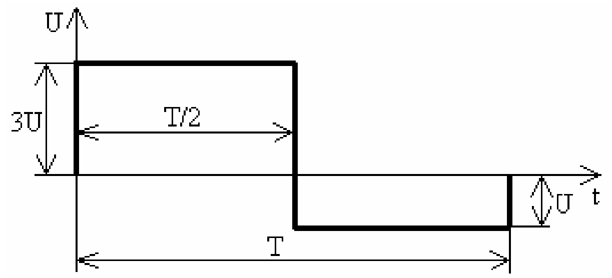
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0})$$

$i_{10} = 1.093$ $\qquad i_{20} = 0.736$ $\qquad i_{30} = 0.357$ $\qquad u_{L0} = 54.143$ $\qquad u_{C0} = 27.007$

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: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \qquad i'_1 = 0.017$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_3 = 8.333 \times 10^{-3} \qquad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \qquad i'_2 = 8.333 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \qquad i_{10} = 0.013 \qquad i_{20} = 0.013 \qquad i_{30} = 0 \qquad u_{L0} = 0.5$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \;\Big|\begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 5 \end{matrix} \rightarrow -480. \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 2.083 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -480$$

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:

$A_1 := i_{10} - i'_1$ $\quad A_1 = -4.167 \times 10^{-3}$

$B_1 := i_{30} - i'_3$ $\quad B_1 = -8.333 \times 10^{-3}$

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:

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)$ $\quad i_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.6667 \cdot 10^{-2} - 4.1667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-480. \cdot t)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)$ $\quad i_3(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 8.3333 \cdot 10^{-3} - 8.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-480. \cdot t)$

$g_{11}(t) := i_1(t)$ $\quad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.6667 \cdot 10^{-2} - 4.1667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-480. \cdot t)$

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

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .50000 \cdot \exp(-480. \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 3E_1$ $\quad U_0 = 300$

$U_1 := 3E_1$ $\quad U_1 = 300$ $\quad 0 < t < \frac{T}{2}$

$U_2 := -E_1$ $\quad U_2 = -100$ $\quad \frac{T}{2} < t < T$

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

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow 5. - 1.25 \cdot \exp(-480. \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow -1.6667 - 1.2500 \cdot \exp(-480. \cdot t) + 1.6667 \cdot \exp(-480. \cdot t + .50000)$$

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

$$i_3(t) \left| \begin{matrix} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{matrix} \right. \rightarrow -1.25 \cdot \exp(-480. \cdot t) + 1.67 \cdot \exp(-480. \cdot t + .500) - .417 \cdot \exp(-480. \cdot t + 1.)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 150.00 \cdot \exp(-480. \cdot t)$$

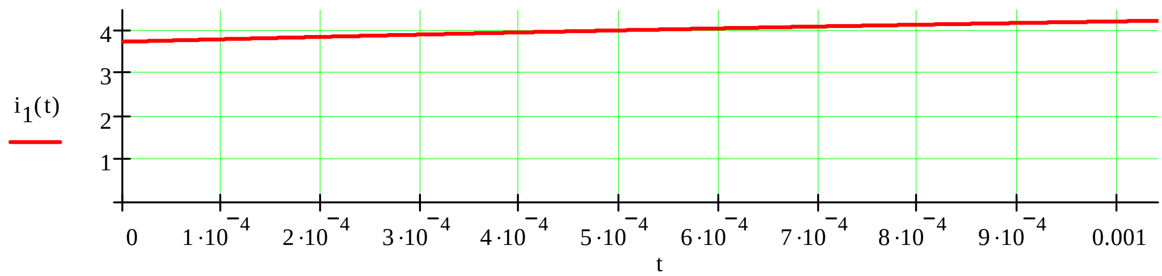
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 150.00 \cdot \exp(-480. \cdot t) - 200.00 \cdot \exp(-480. \cdot t + .50000)$$

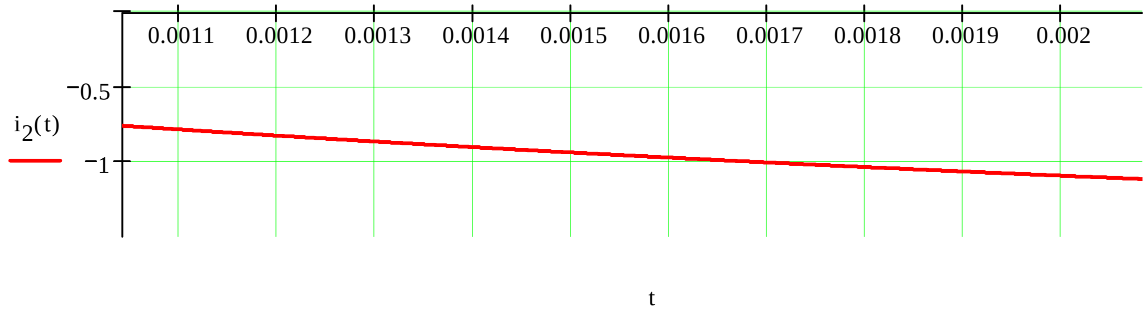
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + \left(U_2 - U_1\right) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \left(U_3 - U_2\right) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \;\rightarrow\; 150.00 \cdot \exp(-480. \cdot t) - 200.00 \cdot \exp(-480. \cdot t + .50000) + 50.000 \cdot \exp(-480. \cdot t + 1.0000)$$

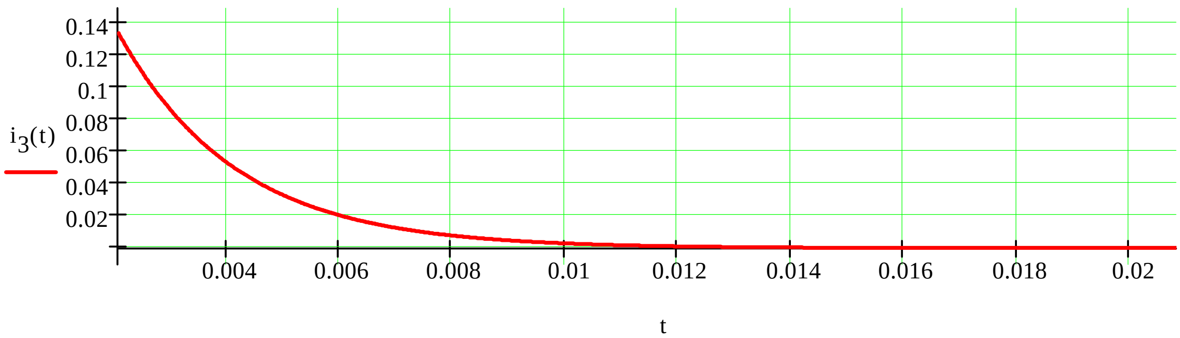
На промежутке от 0 до 1/2T



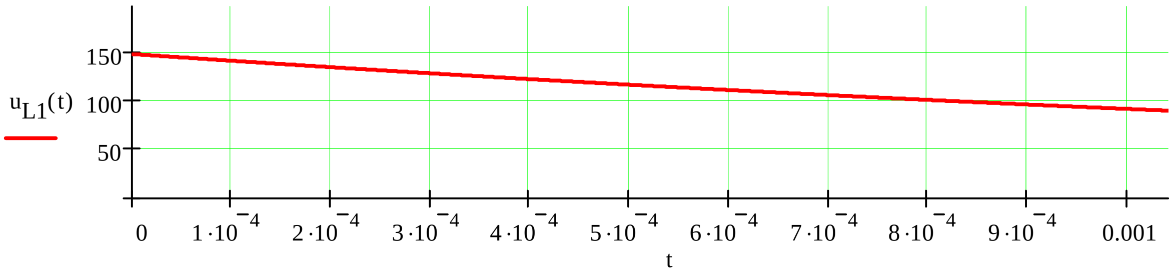
На промежутке от 1/2T до T



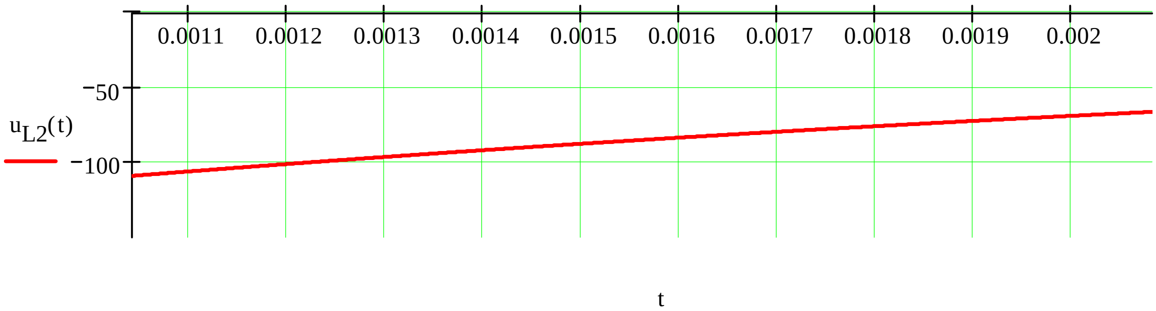
На промежутке от T до 10T



На промежутке от 0 до 1/2T



На промежутке от 2/3T до T



На промежутке от T до 10T