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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах“
Варіант № 804

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.

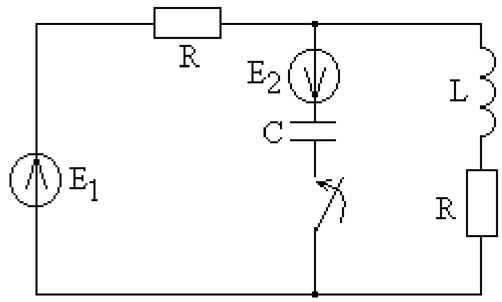
3. В післякомутаційній схемі закоротити джерело ЕДС E2.

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

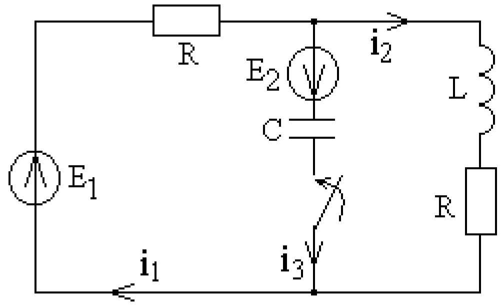
Вхідні данні:

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



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := 0$ $\quad u_{Cдк} = 0$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R}$ $\quad i'_2 := i'_1$ $\quad i'_2 = 1$

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

$u'_C := E_1 + E_2 - i'_1 \cdot R$ $\quad u'_C = 130$

Незалежні початкові умови

$i_{20} := i_{2дк}$ $\quad i_{20} = 1$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{18}{5} \\ \frac{13}{5} \\ -130 \end{pmatrix}$$

$i_{10} = 3.6$ $\quad i_{30} = 2.6$ $\quad u_{L0} = -130$

Незалежні початкові умови

$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L}$ $\quad di_{20} = -650$

$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C}$ $\quad du_{C0} = 1.444 \times 10^4$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$di_{10} = -288.889 \quad di_{30} = 361.111 \quad du_{L0} = 4.694 \times 10^{4}$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \Bigg| \begin{matrix} \mathrm{solve}, p \\ \mathrm{float}, 6 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -180.556 - 151.510 \cdot i \\ -180.556 + 151.510 \cdot i \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$p_1 = -180.556 - 151.51i \qquad p_2 = -180.556 + 151.51i$

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

$\delta := |\mathrm{Re}(p_1)| \quad \delta = 180.556 \qquad \omega_0 := |\mathrm{Im}(p_2)| \quad \omega_0 = 151.51$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(A, v_1)\ \mathrm{float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -2.8601 & 2.8601 \\ -2.0006 & 1.1410 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$A = -2.86 \qquad v_1 = -2.001$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1)\ \mathrm{float}, 5 \rightarrow -2.8601 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t - 2.0006)$

$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t)\ \mathrm{float}, 4 \rightarrow 1. - 2.860 \cdot \exp(-180.6 \cdot t) \cdot \sin(151.5 \cdot t - 2.001)$

Для струму i2(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(B, v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -4.2901 & 4.2901 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$B = -4.29 \qquad v_2 = 0$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -4.2901 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t)$

$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 1. - 4.290 \cdot \exp(-180.6 \cdot t) \cdot \sin(151.5 \cdot t)$

Для струму i3(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(C, v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow \begin{pmatrix} -6.0672 & 6.0672 \\ -2.6987 & .44287 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$C = -6.067 \qquad v_3 = -2.699$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -6.0672 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t - 2.6987)$

$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -6.067 \cdot \exp(-180.6 \cdot t) \cdot \sin(151.5 \cdot t - 2.699)$

Для напруги Uc(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(D, v_C) \left| \begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -143.01 & 143.01 \\ 1.1410 & -2.0006 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$D = -143.01 \qquad v_C = 1.141$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -143.01 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t + 1.1410)$

$u_C(t) := u'_C + u''_C(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow 130. - 143.0 \cdot \exp(-180.6 \cdot t) \cdot \sin(151.5 \cdot t + 1.141)$

Для напруги Ul(t):

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \mathrm{Find}(F, v_L) \left| \begin{matrix} \mathrm{float}, 5 \\ \mathrm{complex} \end{matrix} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -202.24 & 202.24 \\ 2.4434 & -.69815 \end{pmatrix}$$

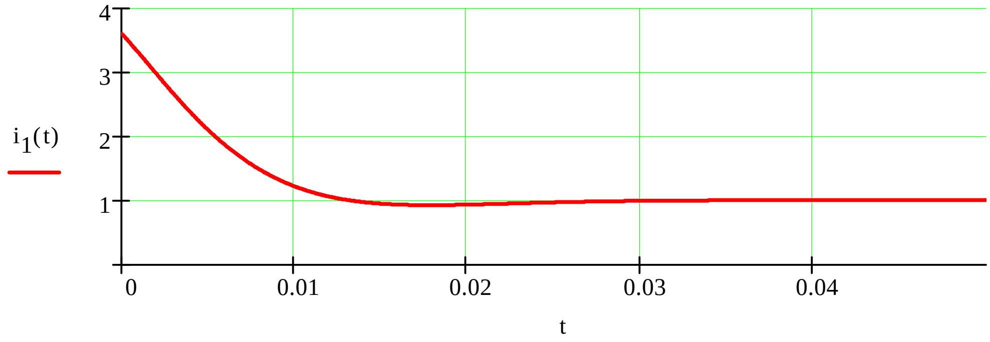
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$F = -202.24 \qquad v_L = 2.443$

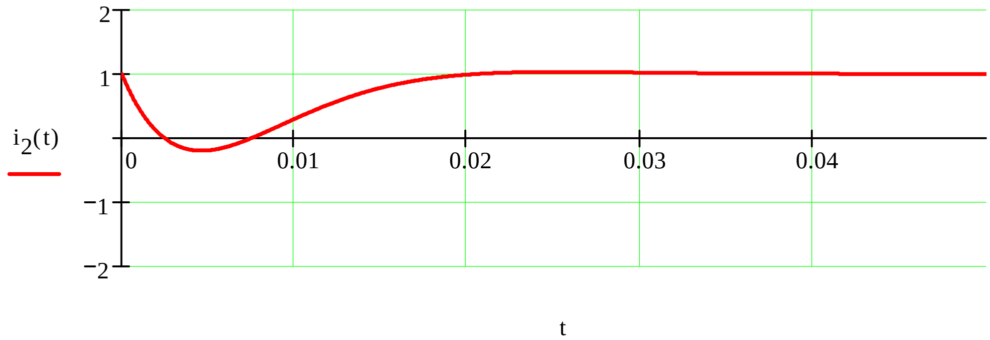
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L)\ \mathrm{float}, 5\ \rightarrow -202.24 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t + 2.4434)$

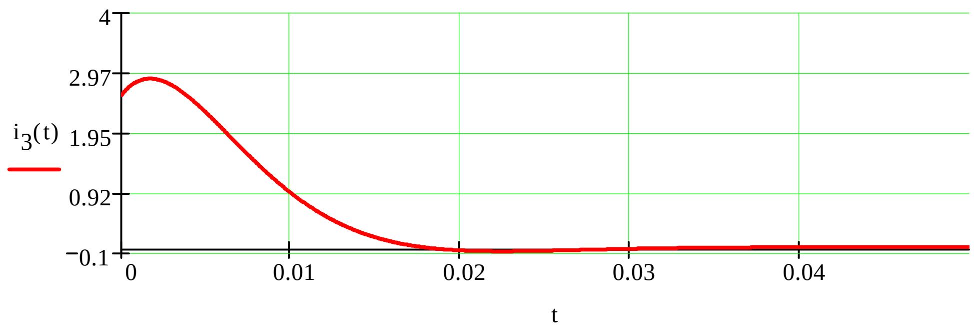
$u_L(t) := u'_L + u''_L(t)\ \mathrm{float}, 4\ \rightarrow -202.2 \cdot \exp(-180.6 \cdot t) \cdot \sin(151.5 \cdot t + 2.443)$



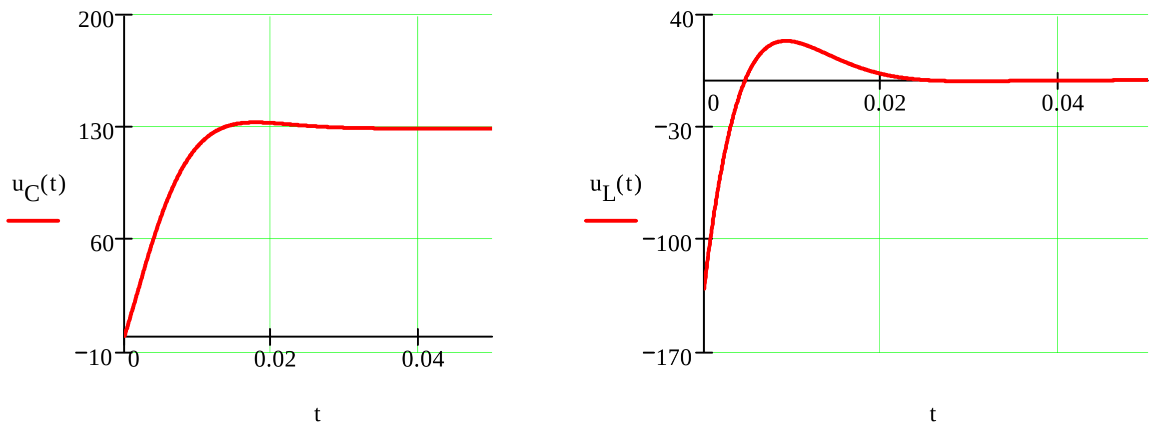
Графік перехідного струму i1(t).



Графік перехідного струму i2(t).

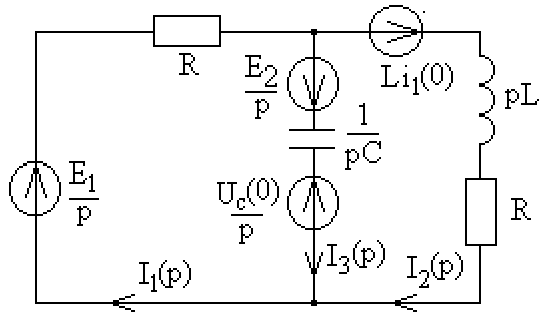


Графік перехідного струму i3(t).



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$i_{3дк} := 0$ $\quad u_{Lдк} := 0$

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - i_{1дк} \cdot R$ $\quad u_{Cдк} = 130$

Початкові умови:

$i_{L0} := i_{2дк}$ $\quad i_{L0} = 1$

$u_{C0} = 0$

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

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

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

$$\Delta_1(p) := \left|\begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \\ -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} & \frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_1(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(10111. \cdot p + 5.5556 \cdot 10^5 + 36.0 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

$$\Delta_2(p) := \left|\begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} + \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C}\right) & -\frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{bmatrix}\right| \qquad \Delta_2(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(5.5556 \cdot 10^5 - 2888.9 \cdot p + 10.000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{2.}}$$

Контурні струми та напруга на індуктивності будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \qquad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(10111. \cdot p + 5.5556 \cdot 10^5 + 36.0 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(5.5556 \cdot 10^5 + 3611.1 \cdot p + 10.000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \qquad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \ \rightarrow \frac{\left(5.5556 \cdot 10^5 - 2888.9 \cdot p + 10.000 \cdot p^{2.}\right)}{p^{1.} \cdot \left(5.5556 \cdot 10^5 + 3611.1 \cdot p + 10.000 \cdot p^{2.}\right)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \ \left|\begin{array}{l}\text{float}, 5\\ \text{simplify}\end{array}\right. \rightarrow \frac{(129999. + 260. \cdot p)}{\left(5555600. + 36111. \cdot p + 100. \cdot p^2\right)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_2(p) - L \cdot i_{2дк} \text{ factor } \rightarrow -13000 \cdot \frac{p}{\left(5555600 + 36111 \cdot p + 100 \cdot p^2\right)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_3(p)}{p \cdot C} \text{ factor } \rightarrow \frac{50000}{9} \cdot \frac{(129999 + 260 \cdot p)}{\left(5555600 + 36111 \cdot p + 100 \cdot p^2\right) \cdot p}$$

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

$$N_1(p) := \left(10111. \cdot p + 5.5556 \cdot 10^5 + 36.0 \cdot p^{2.}\right) \qquad M_1(p) := p \cdot \left(5.5556 \cdot 10^5 + 3611.1 \cdot p + 10.000 \cdot p^{2.}\right)$$

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

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

$N_1(p_0) = 5.556 \times 10^5 \qquad N_1(p_1) = -9.228 \times 10^5 + 4.378i \times 10^5 \qquad N_1(p_2) = -9.228 \times 10^5 - 4.378i \times 10^5$

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

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad i_1(0) = 3.6$$

$$i_1(t) \ \left|\begin{array}{l}\text{float}, 5\\ \text{complex}\end{array}\right. \rightarrow 1.0000 + 2.6000 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \cos(151.51 \cdot t) + 1.19166 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі Uc(p):

$$N_u(p) := \frac{50000}{9} \cdot (129999 + 260 \cdot p) \qquad M_u(p) := p \cdot \left(5555600 + 36111 \cdot p + 100 \cdot p^2\right)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \ \left|\begin{array}{l}\text{solve}, p\\ \text{float}, 15\end{array}\right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -180.555000000000 + 151.512019242699 \cdot i \\ -180.555000000000 - 151.512019242699 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_0 = 0 \qquad p_1 = -180.555 + 151.512i \qquad p_2 = -180.555 - 151.512i$

$N_u(p_0) = 7.222 \times 10^8 \qquad N_u(p_1) = 4.614 \times 10^8 + 2.189i \times 10^8 \qquad N_u(p_2) = 4.614 \times 10^8 - 2.189i \times 10^8$

$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor } \rightarrow 5555600 + 72222 \cdot p + 300 \cdot p^2$

$dM_u(p_0) = 5.556 \times 10^6 \qquad dM_u(p_1) = -4.591 \times 10^6 - 5.471i \times 10^6 \qquad dM_u(p_2) = -4.591 \times 10^6 + 5.471i \times 10^6$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 130.00 - 129.998 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \cos(151.51 \cdot t) - 59.582 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$N_L(p) := -13000p \qquad M_L(p) := \left(5555600 + 36111 \cdot p + 100 \cdot p^2\right)$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 15 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -180.555000000000 + 151.512019242699 \cdot i \\ -180.555000000000 - 151.512019242699 \cdot i \end{pmatrix}$$

$p_1 = -180.555 + 151.512i \qquad p_2 = -180.555 - 151.512i$

$N_L(p_1) = 2.347 \times 10^6 - 1.97i \times 10^6 \qquad N_L(p_2) = 2.347 \times 10^6 + 1.97i \times 10^6$

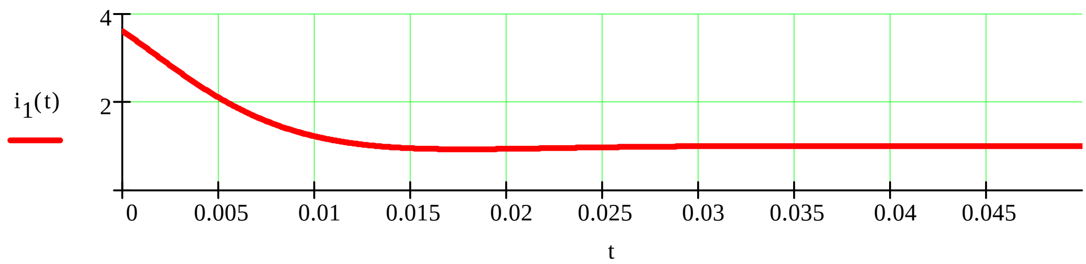
$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor } \rightarrow 36111 + 200 \cdot p$

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

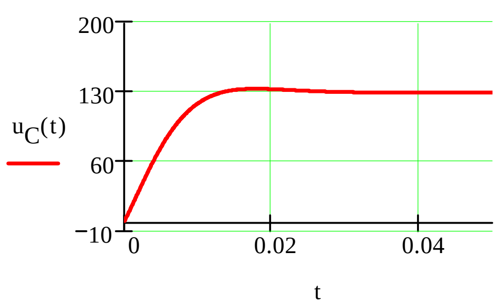
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

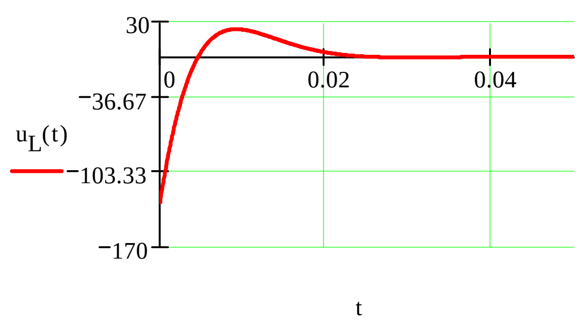
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \qquad u_L(0) = -130$$

$$u_L(t) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -130.000 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \cos(151.51 \cdot t) + 154.920 \cdot \exp(-180.56 \cdot t) \cdot \sin(151.51 \cdot t)$$



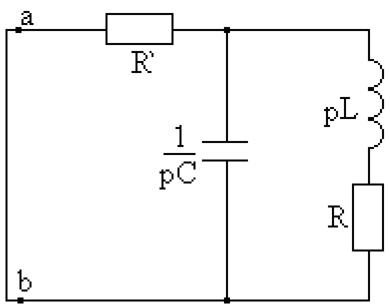
Графік перехідного струму i1(t).





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

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



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

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

$$D = 0$$

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

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

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

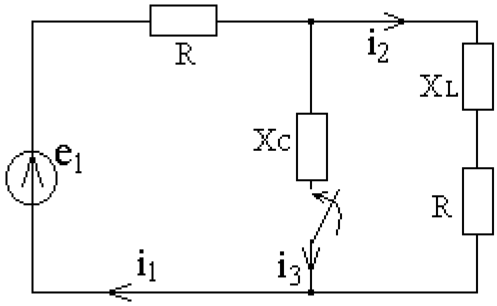
Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги Е1 і Е2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

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

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

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

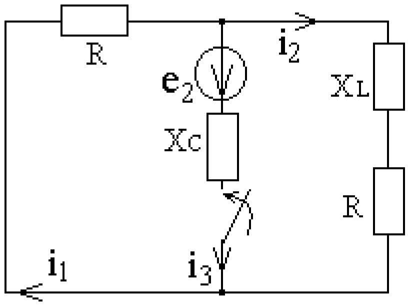


$Z'_{vx} := 2\cdot R + X_L\cdot i$ $\qquad$ $Z'_{vx} = 100 + 20i$

$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$ $\qquad$ $I'_{1дк} = 0.929 + 0.314i$ $\qquad$ $F(I'_{1дк}) = (0.981 \;\; 18.69)$

$I'_{2дк} := I'_{1дк}$ $\qquad$ $I'_{2дк} = 0.929 + 0.314i$ $\qquad$ $F(I'_{2дк}) = (0.981 \;\; 18.69)$

$I'_{3дк} := 0$



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

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

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

$I_{1дк} := I'_{1дк} + I''_{1дк}$ $\qquad I_{1дк} = 0.929 + 0.314i$ $\qquad F(I_{1дк}) = (0.981 \quad 18.69)$

$I_{2дк} := I'_{2дк} + I''_{2дк}$ $\qquad I_{2дк} = 0.929 + 0.314i$ $\qquad F(I_{2дк}) = (0.981 \quad 18.69)$

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

$u_{Cдк} := E_1 + E_2 - I_{1дк} \cdot R$ $\qquad u_{Cдк} = 109.441 + 74.289i$ $\qquad F(u_{Cдк}) = (132.273 \quad 34.169)$

$u_{Lдк} := I_{1дк} \cdot i \cdot X_L$ $\qquad u_{Lдк} = -6.285 + 18.577i$ $\qquad F(u_{Lдк}) = (19.612 \quad 108.69)$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$u_{Cдк}(0) = 105.06$

$i_{Lдк}(0) = 0.444$

Given

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

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

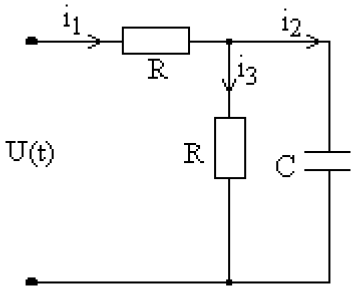
$$-e_2(0) = i_{20} \cdot R - u_{C0} + u_{L0}$$

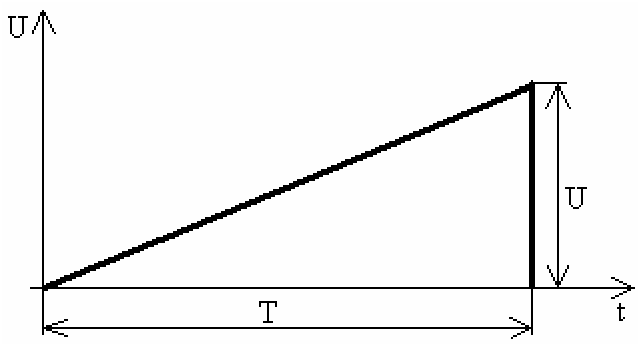
$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \mathrm{Find}\left(i_{10}, i_{30}, u_{L0}\right)$$

$i_{10} = 3.515$ $\qquad i_{20} = 0.444$ $\qquad i_{30} = 3.071$ $\qquad u_{L0} = 26.272$ $\qquad u_{C0} = 105.06$

Інтеграл Дюамеля

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





Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

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

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

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$i'_1 := \frac{E}{R + R}$ $\qquad i'_1 = 0.01$

$i'_3 := i'_1$ $\qquad i'_3 = 0.01$ $\qquad i'_2 := 0$ $\qquad i'_2 = 0$

$u'_C := E - i'_1 \cdot R$ $\qquad u'_C = 0.5$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

$E = i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R$

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

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

$i_{10} = 0.02$ $\qquad i_{20} = 0.02$ $\qquad i_{30} = 0$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характерестичне рівняння схеми

$$Z_{vx}(p) := R + \frac{R \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R + \frac{1}{p \cdot C}} \qquad Zvx(p) := \frac{R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \left| \begin{matrix} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{matrix} \right. \rightarrow -222.22 \qquad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \qquad T = 4.5 \times 10^{-3}$$

Отже корень характеристичного рівняння має вигляд: $p = -222.22$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$A_1 := i_{10} - i'_1$ $\quad\quad A_1 = 0.01$

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

Повні значення цих струмів:

$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad\quad g_{11}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 1.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-222.22 \cdot t)$

$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R+R} \cdot \left(1 - e^{p \cdot t}\right) \text{ float}, 5 \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-222.22 \cdot t)$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$U_0 := 0 \quad\quad U_0 = 0$

$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{T} \cdot t \quad\quad U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 22222. \cdot t \quad\quad 0 < t < T$

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

$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 22222.$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau)\, d\tau \quad\quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 222. \cdot t + 1. - 1. \cdot \exp(-222. \cdot t)$

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

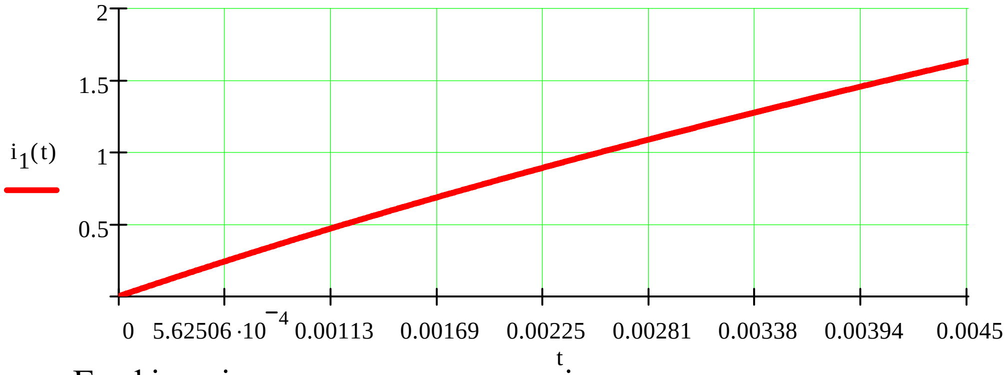
$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -1.00 \cdot 10^{-20} - 1. \cdot \exp(-222. \cdot t)$

Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

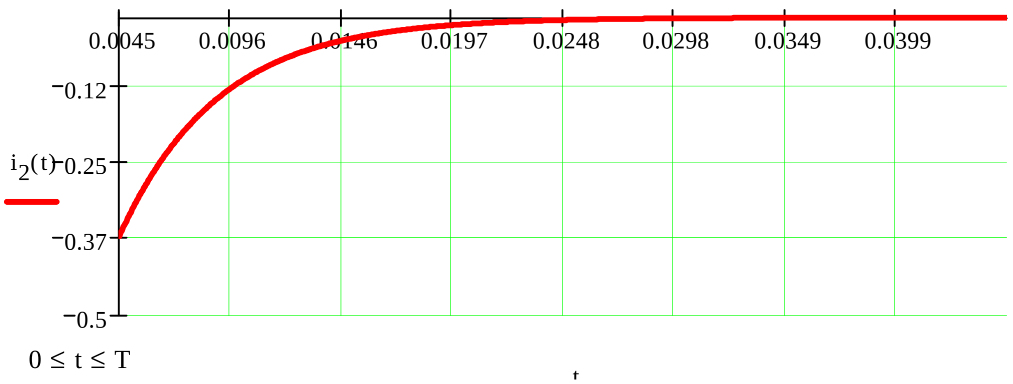
$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau)\, d\tau \text{ float}, 4 \rightarrow 1.111 \cdot 10^4 \cdot t - 50. + 50. \cdot \exp(-222.2 \cdot t)$

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

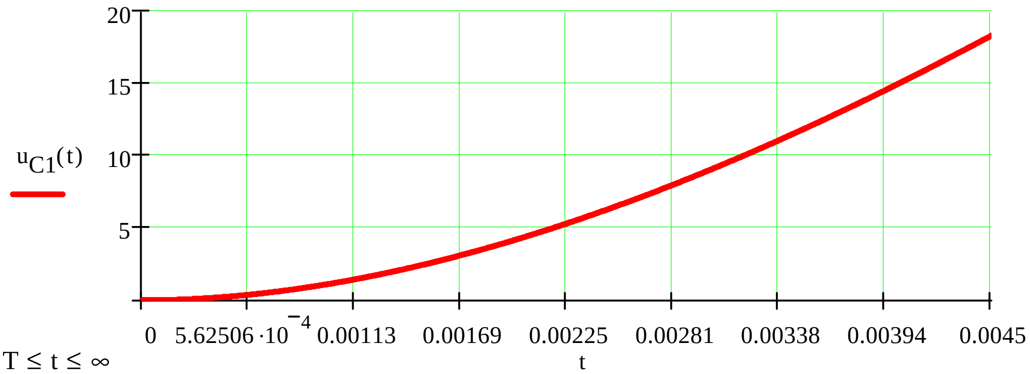
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \le t \le T$



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



$0 \le t \le T$



$T \le t \le \infty$