

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 168

Виконав: _____

Перевірив: _____

Умова завдання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

- 1) класичним методом розрахувати напруги на реактивних елементах та струми перехідного процесу;
- 2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС E_1 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 E_1 , 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 E_1 і E_2 в колі діють синусоїдні джерела.

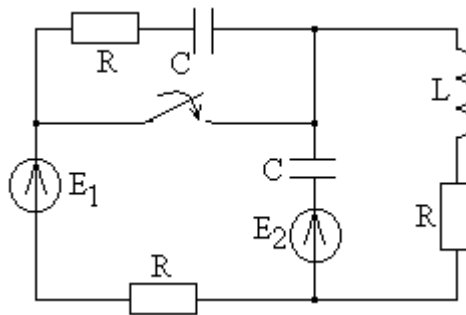
3. В післякомутаційній схемі замкнути джерело ЕДС E_2 .

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

б) вважаючи, що замість джерела постійної ЕДС E_1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивному 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 елементах.



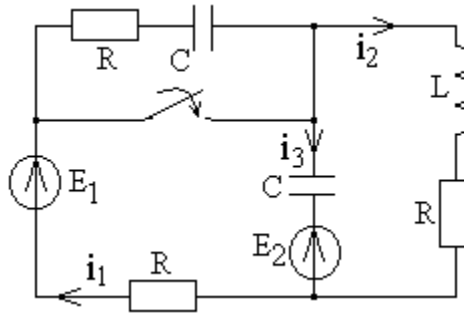
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.2$	Гн	$C := 170 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 80$	Ом		
$E_1 := 120$	В	$E_2 := 100$	В	$\psi := 150 \cdot \text{deg}$	C^0	$\omega := 150$	c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := 0 \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 0$$

$$i_{3\text{ДК}} := 0$$

$$u_{\text{CDK}} := -E_2 \quad u_{\text{CDK}} = -100 \quad u_{\text{LDK}} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 0.75$$

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

$$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R \quad u'_C = -40$$

Незалежні початкові умови

$$i_{20} := i_{2\text{ДК}} \quad i_{20} = 0$$

$$u_{\text{C0}} := u_{\text{CDK}} \quad u_{\text{C0}} = -100$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{\text{L0}} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{\text{L0}}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.500000 \\ 1.500000 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = 1.5 \quad i_{30} = 1.5 \quad u_{\text{L0}} = 0$$

Незалежні початкові умови

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

$$du_{\text{C0}} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{\text{C0}} = 8.824 \times 10^3$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0}) \quad di_{10} = -110.294 \quad di_{30} = -110.294 \quad du_{L0} = 8.824 \times 10^3$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \Big|_{\text{solve}, p} \rightarrow \begin{pmatrix} -236.76 - 52.593 \cdot i \\ -236.76 + 52.593 \cdot i \end{pmatrix}$$

Отже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

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

Коефіцієнт затухання та кутова частота вільних коливань:

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

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 $i_1(t)$:

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} A \\ v_1 \end{pmatrix} := \text{Find}(A, v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -1.4828 & 1.4828 \\ -2.6113 & .53030 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$A = -1.483 \quad v_1 = -2.611$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_1) \text{ float}, 5 \rightarrow -1.4828 \cdot \exp(-236.76 \cdot t) \cdot \sin(52.593 \cdot t - 2.6113)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 4 \rightarrow .7500 - 1.483 \cdot \exp(-236.8 \cdot t) \cdot \sin(52.59 \cdot t - 2.611)$$

Для струму $i_2(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} B \\ v_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B, v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 3.4586 & -3.4586 \\ -2.9230 & .21859 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$B = 3.459 \quad v_2 = -2.923$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_2(t) := B \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_2) \text{ float}, 5 \rightarrow 3.4586 \cdot \exp(-236.76 \cdot t) \cdot \sin(52.593 \cdot t - 2.9230)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 4 \rightarrow .7500 + 3.459 \cdot \exp(-236.8 \cdot t) \cdot \sin(52.59 \cdot t - 2.923)$$

Для струму $i_3(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} C \\ v_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(C, v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} -4.8912 & 4.8912 \\ -2.8299 & .31170 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$C = -4.891 \quad v_3 = -2.83$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$i''_3(t) := C \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_3) \text{ float}, 5 \rightarrow -4.8912 \cdot \exp(-236.76 \cdot t) \cdot \sin(52.593 \cdot t - 2.8299)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -4.891 \cdot \exp(-236.8 \cdot t) \cdot \sin(52.59 \cdot t - 2.830)$$

Для напруги $U_C(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ v_C \end{pmatrix} := \text{Find}(D, v_C) \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -118.63 & 118.63 \\ .53030 & -2.6113 \end{pmatrix}$$

Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$D = -118.63 \quad v_C = 0.53$$

Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_C) \text{ float}, 5 \rightarrow -118.63 \cdot \exp(-236.76 \cdot t) \cdot \sin(52.593 \cdot t + .53030)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 4 \rightarrow -40. - 118.6 \cdot \exp(-236.8 \cdot t) \cdot \sin(52.59 \cdot t + .5303)$$

Для напруги $U_L(t)$:

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

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

$$\begin{pmatrix} F \\ v_L \end{pmatrix} := \text{Find}(F, v_L) \begin{matrix} \text{float}, 5 \\ \text{complex} \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 167.77 & -167.77 \\ 0 & 3.1416 \end{pmatrix}$$

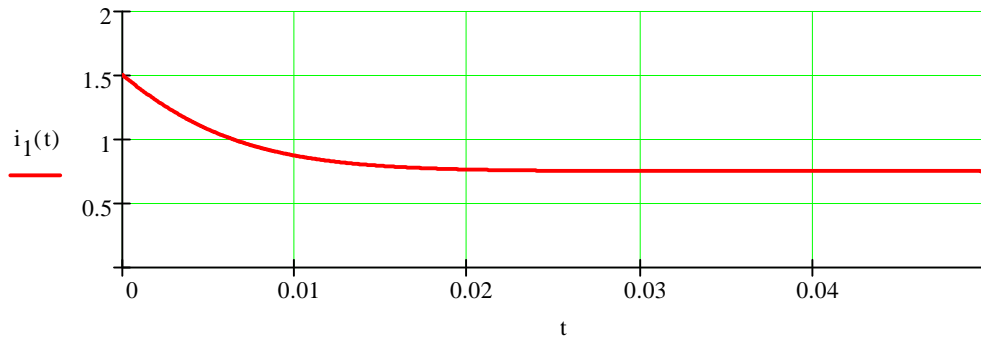
Отже сталі інтегрування дорівнюють:

$$F = 167.77 \quad v_L = 0$$

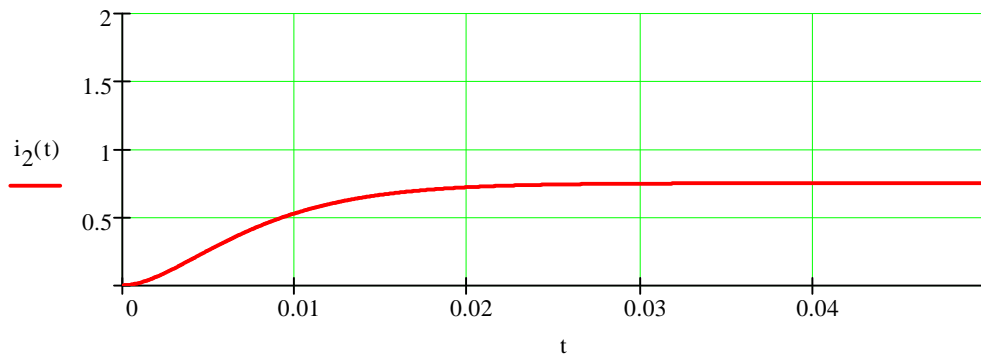
Тоді вільна складова буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + v_L) \text{ float}, 5 \rightarrow 167.77 \cdot \exp(-236.76 \cdot t) \cdot \sin(52.593 \cdot t)$$

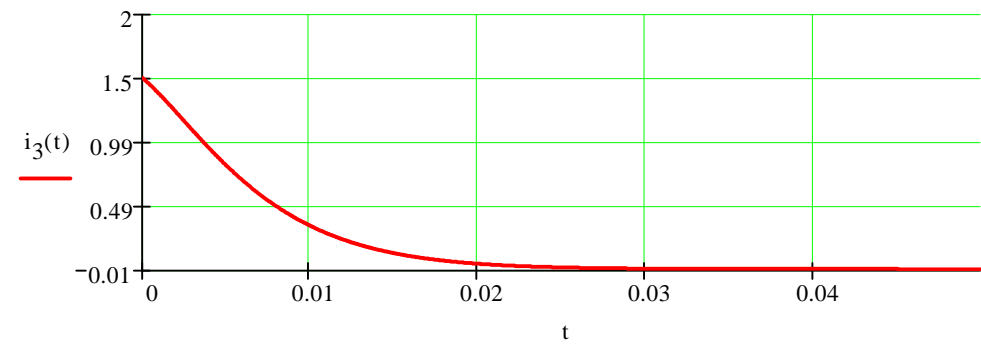
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 4 \rightarrow 167.8 \cdot \exp(-236.8 \cdot t) \cdot \sin(52.59 \cdot t)$$



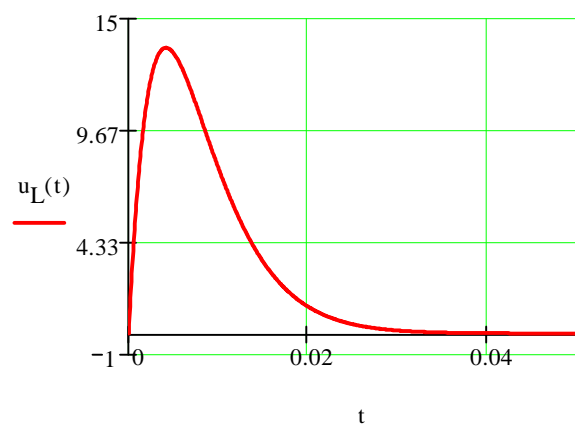
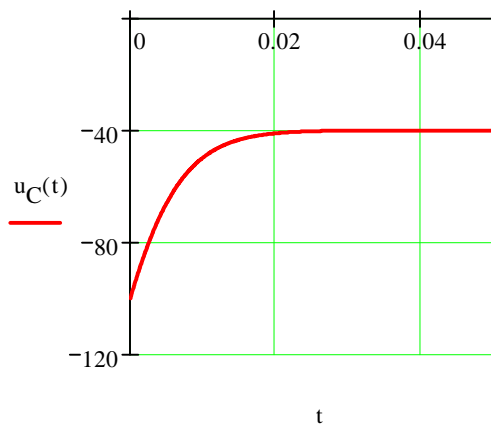
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

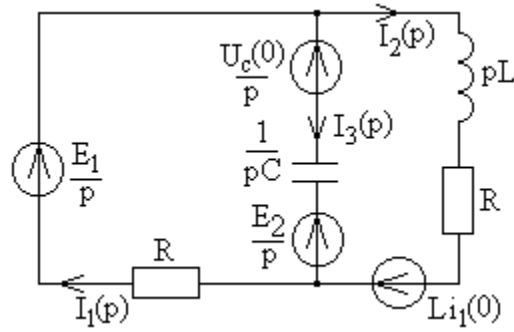


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := 0 \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 0$$

$$i_{3\text{ДК}} := 0$$

$$u_{\text{CДК}} := -E_2$$

$$u_{\text{CДК}} = -100$$

$$u_{\text{LДК}} := -u_{\text{CДК}} + E_2$$

$$u_{\text{LДК}} = 200$$

Початкові умови:

$$i_{\text{L}0} := i_{2\text{ДК}} \quad i_{\text{L}0} = 0$$

$$u_{\text{C}0} = -100$$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) - I_{k2}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C}0}}{p}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} \right) + I_{k2}(p) \cdot \left(p \cdot L + R + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{\text{C}0}}{p} + L \cdot i_{20}$$

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) & p \cdot L + R + \frac{1}{p \cdot C} \end{vmatrix}$$

$$\Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (7576.5 \cdot p + 16.000 \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C}0}}{p} & -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{\text{C}0}}{p} + L \cdot i_{20} & p \cdot L + R + \frac{1}{p \cdot C} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{120.}{p^1} \cdot \left(80. + .2 \cdot p + \frac{5882.4}{p^1} \right)$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C}0}}{p} \\ -\left(\frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{\text{C}0}}{p} + L \cdot i_{20} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{7.0588 \cdot 10^5}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 48 \cdot \frac{(400 \cdot p + p^2 + 29412.)}{p \cdot (15153 \cdot p + 32 \cdot p^2 + 1882360.)}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float, 5} \rightarrow \frac{7.0588 \cdot 10^5}{p^{1.} \cdot (7576.5 \cdot p + 16.000 \cdot p^2 + 9.4118 \cdot 10^5)^{1.}}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow 16 \cdot \frac{(1200 \cdot p + 3 \cdot p^2 + 1.)}{p \cdot (15153 \cdot p + 32 \cdot p^2 + 1882360.)}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{282352}{(15153 \cdot p + 32 \cdot p^2 + 1882360)}$$

Перейдемо тепер від зображення до функції часу за формулою розкладу:
Для струму $I_1(p)$:

$$N_1(p) := 48 \cdot (400 \cdot p + p^2 + 29412.) \quad M_1(p) := p \cdot (15153 \cdot p + 32 \cdot p^2 + 1882360.)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -236.77 - 52.591 \cdot i \\ -236.77 + 52.591 \cdot i \end{pmatrix}$$

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

$$N_1(p_0) = 1.412 \times 10^6 \quad N_1(p_1) = -5.761 \times 10^5 + 1.856i \times 10^5 \quad N_1(p_2) = -5.761 \times 10^5 - 1.856i \times 10^5$$

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

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow .74999 + .74984 \cdot \exp(-236.77 \cdot t) \cdot \cos(52.591 \cdot t) + 1.27926 \cdot \exp(-236.77 \cdot t) \cdot \sin(52.591 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 282352 \quad M_L(p) := (15153 \cdot p + 32 \cdot p^2 + 1882360)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -236.77 + 52.592 \cdot i \\ -236.77 - 52.592 \cdot i \end{pmatrix} \quad p_1 = -236.77 + 52.592i \quad p_2 = -236.77 - 52.592i$$

$$N_L(p_1) = 2.824 \times 10^5 \quad N_L(p_2) = 2.824 \times 10^5$$

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

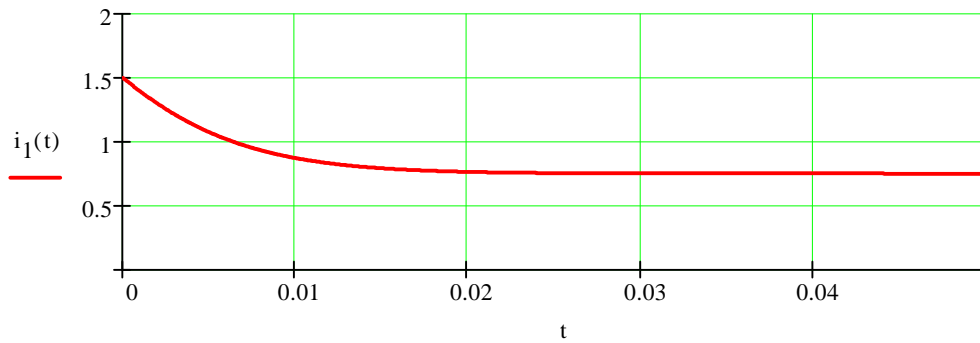
$$dM_L(p_1) = -0.28 + 3.366i \times 10^3 \quad dM_L(p_2) = -0.28 - 3.366i \times 10^3$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

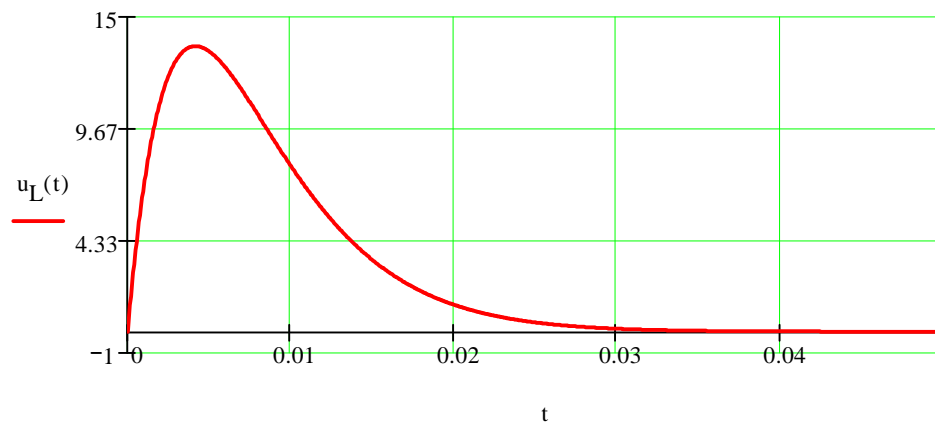
$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t}$$

$$u_L(0) = -0.014$$

$$u_L(t) \begin{cases} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{cases} \rightarrow -1.39566 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-236.77 \cdot t) \cdot \cos(52.592 \cdot t) + 167.772 \cdot \exp(-236.77 \cdot t) \cdot \sin(52.592 \cdot t)$$



Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідної індуктивності.

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

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

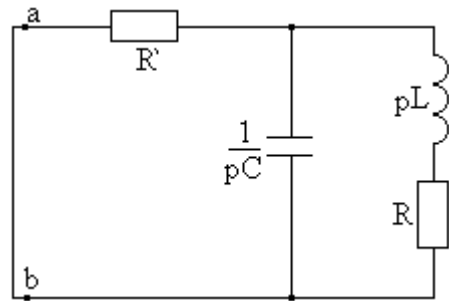
$$Z_{ab}(p) := \frac{\mathbf{R'} \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L\right) + \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (R + p \cdot L)}{\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L}$$

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

$$D = 0$$

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

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



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 синусоїдної напруги:

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

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

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$X_C = 39.216$$

$$X_L := \omega \cdot L$$

$$X_L = 30$$

$$E_1 := E_1 \cdot e^{\psi \cdot i}$$

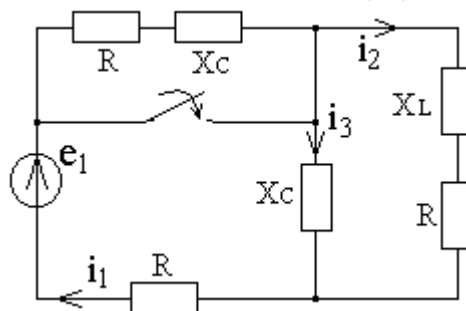
$$E_1 = -103.923 + 60i$$

$$F(E_1) = (120 \ 150)$$

$$E_2 := E_2 \cdot e^{\psi \cdot i}$$

$$E_2 = -86.603 + 50i$$

$$F(E_2) = (100 \ 150)$$



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

$$Z'_{vx} = 178.972 - 76.246i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$$

$$I'_{1дк} = -0.612 + 0.074i$$

$$F(I'_{1дк}) = (0.617 \ 173.075)$$

$$I'_{2дк} := I'_{1дк} \cdot \frac{(-i \cdot X_C)}{R + X_L \cdot i - i \cdot X_C}$$

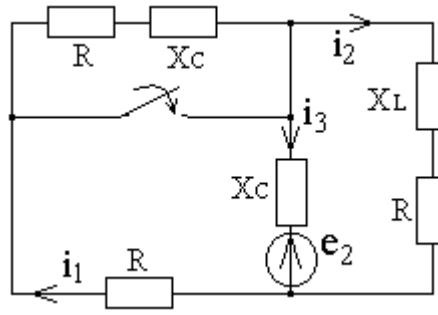
$$I'_{2дк} = 1.854 \times 10^{-3} + 0.3i$$

$$F(I'_{2дк}) = (0.3 \ 89.646)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$$

$$I'_{3дк} = -0.614 - 0.226i$$

$$F(I'_{3дк}) = (0.654 \ -159.798)$$



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

$$Z''_{vx} = 57.884 - 30.065i$$

$$I''_{3dk} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$$

$$I''_{3dk} = -1.532 + 0.068i$$

$$F(I''_{3dk}) = (1.533 \quad 177.447)$$

$$I''_{1dk} := I''_{3dk} \cdot \frac{(R + i \cdot X_L)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C}$$

$$I''_{1dk} = -0.512 - 0.188i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.545 \quad -159.798)$$

$$I''_{2dk} := I''_{3dk} - I''_{1dk}$$

$$I''_{2dk} = -1.02 + 0.257i$$

$$F(I''_{2dk}) = (1.052 \quad 165.875)$$

$$I_{1dk} := I'_{1dk} + I''_{1dk}$$

$$I_{1dk} = -1.124 - 0.114i$$

$$F(I_{1dk}) = (1.13 \quad -174.211)$$

$$I_{2dk} := I'_{2dk} + I''_{2dk}$$

$$I_{2dk} = -1.018 + 0.557i$$

$$F(I_{2dk}) = (1.16 \quad 151.312)$$

$$I_{3dk} := I'_{3dk} - I''_{3dk}$$

$$I_{3dk} = 0.917 - 0.294i$$

$$F(I_{3dk}) = (0.963 \quad -17.786)$$

$$u_{Cdk} := I_{3dk} \cdot (-i \cdot X_C)$$

$$u_{Cdk} = -11.541 - 35.976i$$

$$F(u_{Cdk}) = (37.782 \quad -107.786)$$

$$u_{Ldk} := I_{1dk} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{Ldk} = 3.419 - 33.726i$$

$$F(u_{Ldk}) = (33.899 \quad -84.211)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = -50.878$$

$$i_{20} = 0.788$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 0.813$$

$$i_{20} = 0.788$$

$$i_{30} = 0.025$$

$$u_{L0} = -43.186$$

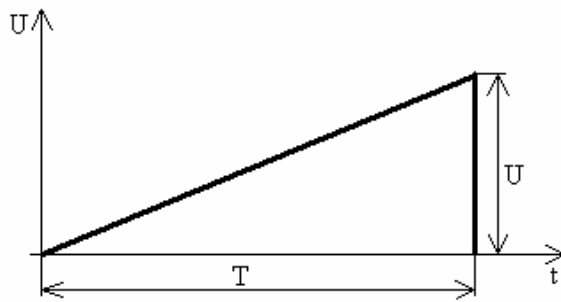
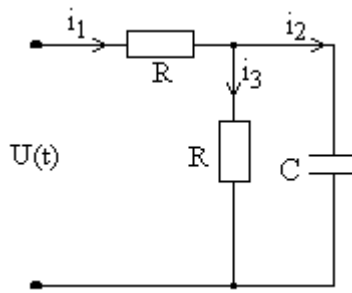
$$u_{C0} = -50.878$$

Інтеграл Дюамеля

$$T := 1.0$$

$$E_1 := 120$$

$$E := 1$$



Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{0}{R + R}$$

$$i_{1\text{дк}} = 0$$

$$i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}}$$

$$i_{3\text{дк}} = 0$$

$$i_{2\text{дк}} := 0$$

$$i_{2\text{дк}} = 0$$

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

$$u_{\text{Cдк}} = 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

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

$$i'_1 = 6.25 \times 10^{-3}$$

$$i'_3 := i'_1$$

$$i'_3 = 6.25 \times 10^{-3}$$

$$i'_2 := 0$$

$$i'_2 = 0$$

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

$$u'_C = 0.5$$

Незалежні початкові умови

$$u_{\text{C0}} := u_{\text{Cдк}}$$

$$u_{\text{C0}} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 0.013$$

$$i_{20} = 0.013$$

$$i_{30} = 0$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z_{\text{vx}}(p) := R + \frac{R \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

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

$$p := R \cdot \left(R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow -147.06$$

$$T := \frac{1}{|p|} \cdot T$$

$$T = 6.8 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -147.06$$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$$A_1 := i_{10} - i'_1 \quad A_1 = 6.25 \times 10^{-3}$$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 6.2500 \cdot 10^{-3} + 6.2500 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-147.06 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot (1 - e^{p \cdot t}) \text{ float,5} \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-147.06 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

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

$$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 17647 \cdot t \quad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 17647.$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 110 \cdot t + .750 - .750 \cdot \exp(-147 \cdot t)$$

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

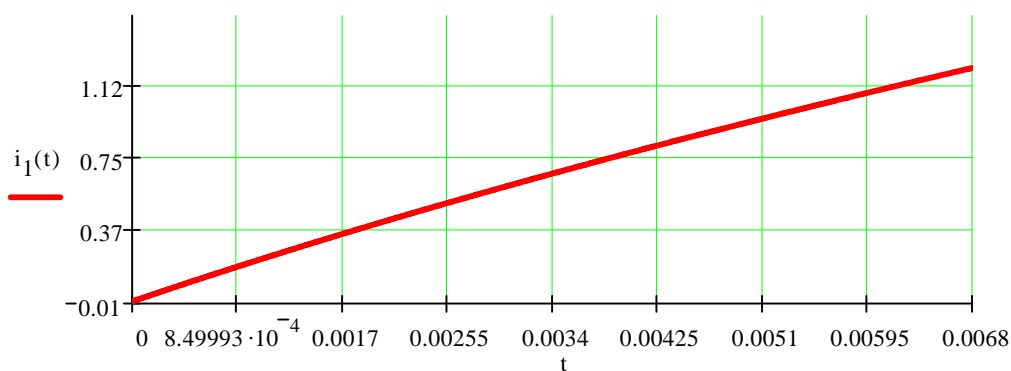
$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -8.50 \cdot 10^{-6} - 8.50 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-147 \cdot t + 1.) - .750 \cdot \exp(-147 \cdot t)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

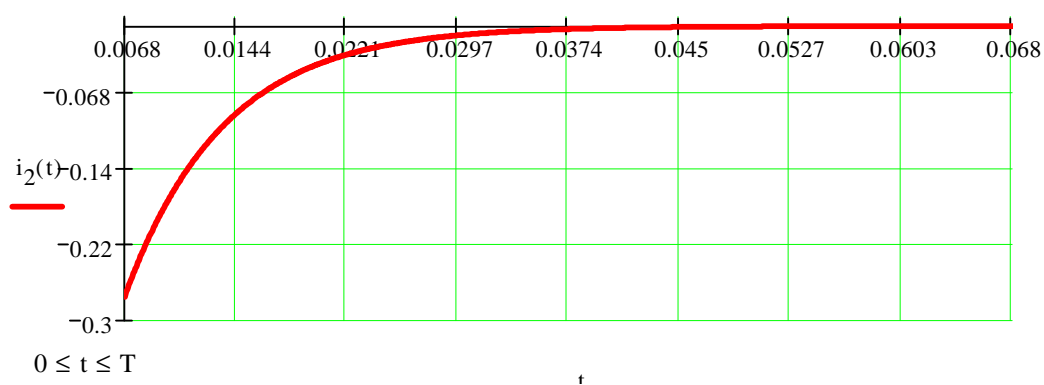
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,4} \rightarrow 8824 \cdot t - 60.00 + 60.00 \cdot \exp(-147.1 \cdot t)$$

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

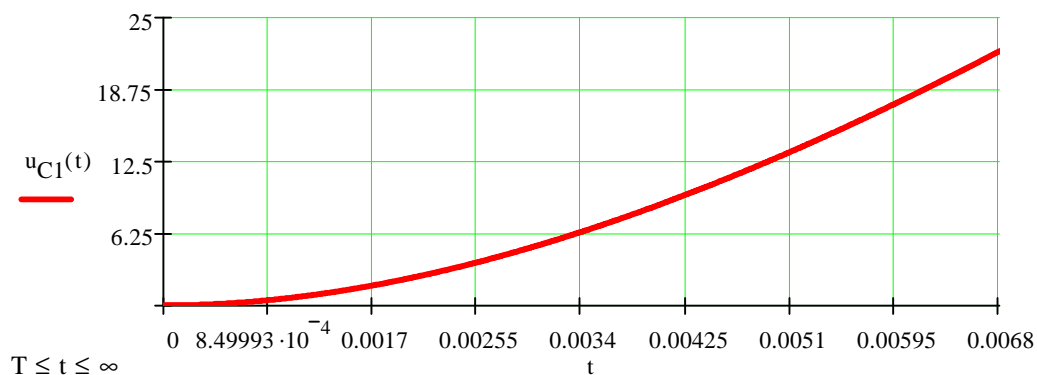
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \leq t \leq T$



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



$0 \leq t \leq T$



$T \leq t \leq \infty$

