

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 353

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.

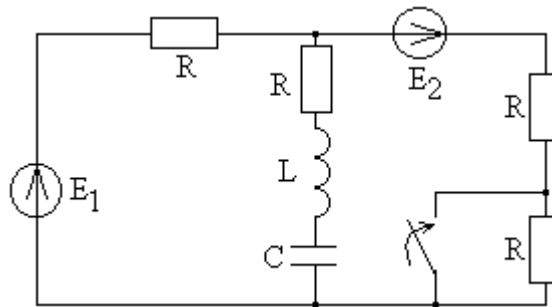
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

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.



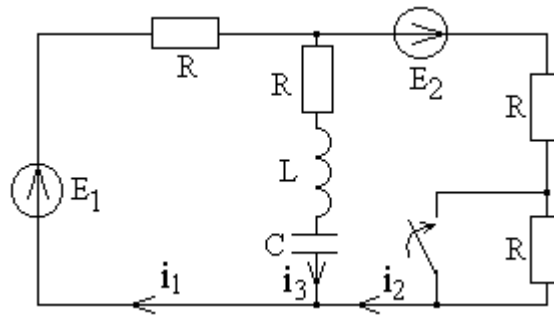
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.1$	Гн	$C := 200 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 50$	Ом	
$E_1 := 70$	В	$E_2 := 50$	В	$\psi := 210 \cdot \text{deg}$	C^0	$\omega := 100 \text{ c}^{-1}$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 0.8$$

$$i_{3\text{ДК}} := 0 \quad u_{L\text{ДК}} := 0$$

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = 30$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 1.2$$

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

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

Незалежні початкові умови

$$i_{30} := i_{3\text{ДК}} \quad i_{30} = 0$$

$$u_{C0} := u_{C\text{ДК}} \quad u_{C0} = 30$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E_1 = u_{L0} + u_{C0} + i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R$$

$$E_2 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0} - u_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.200000 \\ 1.200000 \\ -20. \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = 1.2 \quad i_{20} = 1.2 \quad u_{L0} = -20$$

Незалежні початкові умови

$$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{30} = -200$$

$$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$0 = du_{L0} + du_{C0} + di_{30} \cdot R + di_{10} \cdot R$$

$$0 = di_{20} \cdot R - di_{30} \cdot R - du_{C0} - du_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{20} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{20}, du_{L0})$$

$$di_{10} = -100 \quad di_{20} = 100 \quad du_{L0} = 1.5 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z(p) := \frac{R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right)}{2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}} + R \quad Z(p) := \frac{R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left(2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot R}{2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left(2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot R \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -676.04 \\ -73.960 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -676.04$$

$$p_2 = -73.96$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

$$i''_1(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i''_2(t) = B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i''_3(t) = C_1 \cdot e^{p_1 t} + C_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$u''_C(t) = D_1 \cdot e^{p_1 t} + D_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$u''_L(t) = F_1 \cdot e^{p_1 t} + F_2 \cdot e^{p_2 t}$$

Визначення сталих інтегрування:

Given

$$i_{10} - i'_1 = A_1 + A_2$$

$$di_{10} - 0 = p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2$$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 0.166 \quad A_2 = -0.166$$

Отже вільна складова струму $i_1(t)$ буде мати вигляд:

$$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad \text{float, 7} \rightarrow 1.200000 + .1660909 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) - .1660909 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \quad i_1(0) = 1.2$$

Given

$$i_{20} - i'_2 = B_1 + B_2$$

$$di_{20} - 0 = p_1 \cdot B_1 + p_2 \cdot B_2$$

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -0.166 \quad B_2 = 0.166$$

Отже вільна складова струму $i_2(t)$ буде мати вигляд:

$$i_2''(t) := B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i_2(t) := i_2' + i_2''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.200000 - .1660909 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) + .1660909 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \quad i_2(0) = 1.2$$

Given

$$i_{30} - i_3' = C_1 + C_2$$

$$di_{30} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2$$

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 0.332 \quad C_2 = -0.332$$

Отже вільна складова струму $i_3(t)$ буде мати вигляд:

$$i_3''(t) := C_1 \cdot e^{p_1 t} + C_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$i_3(t) := i_3' + i_3''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow .3321818 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) - .3321818 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \quad i_3(0) = 0$$

Given

$$u_{C0} - u_C' = D_1 + D_2$$

$$du_{C0} - 0 = p_1 \cdot D_1 + p_2 \cdot D_2$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -2.457 \quad D_2 = 22.457$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

$$u_C''(t) := D_1 \cdot e^{p_1 t} + D_2 \cdot e^{p_2 t}$$

$$u_C(t) := u_C' + u_C''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 10. - 2.456816 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) + 22.45682 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \quad u_C(0) = 30$$

Given

$$u_{L0} - u_L' = F_1 + F_2$$

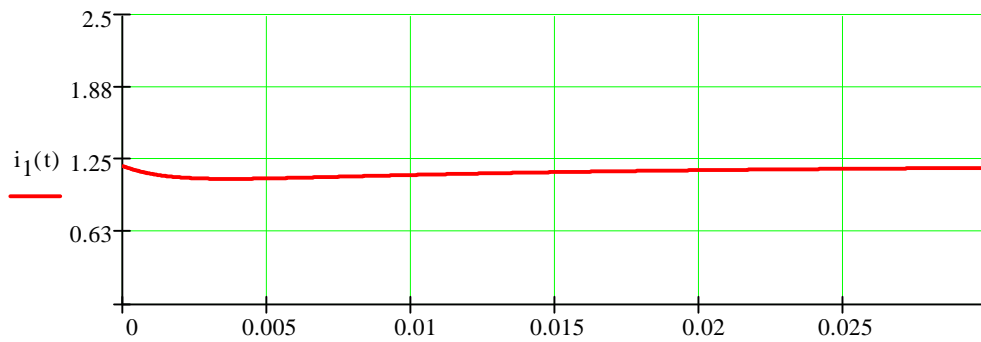
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = -22.457 \quad F_2 = 2.457$$

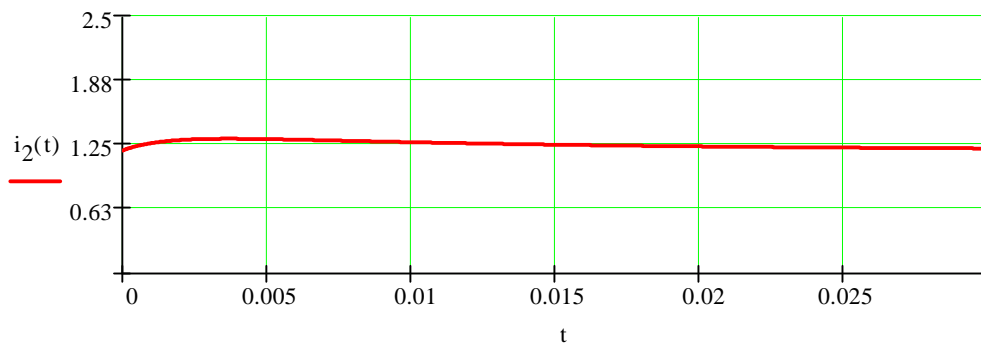
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$$u_L''(t) := F_1 \cdot e^{p_1 t} + F_2 \cdot e^{p_2 t}$$

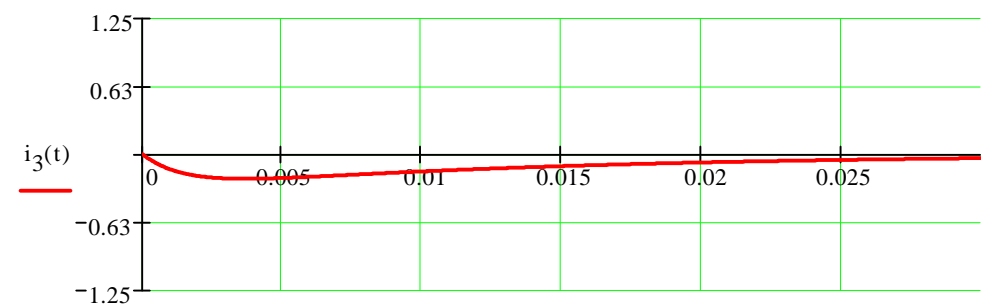
$$u_L(t) := u_L' + u_L''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -22.45682 \cdot \exp(-676.04 \cdot t) + 2.456816 \cdot \exp(-73.960 \cdot t) \quad u_L(0) = -20$$



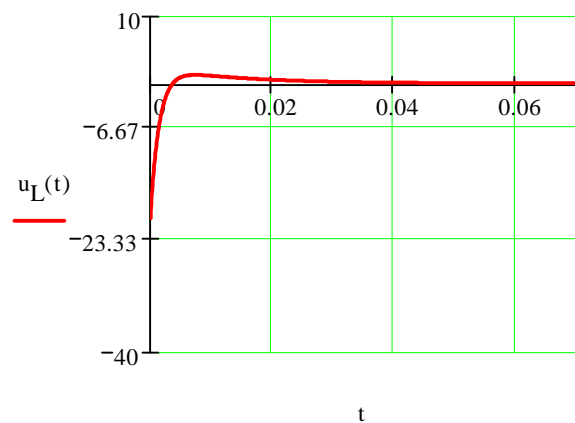
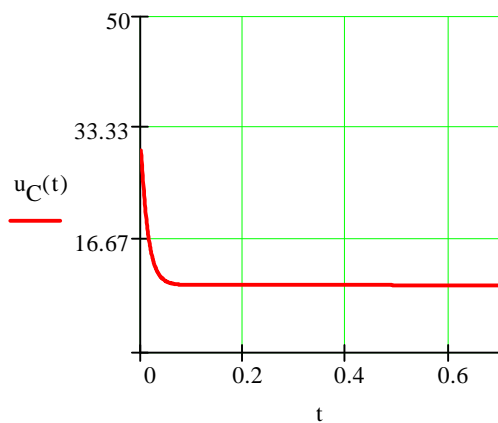
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

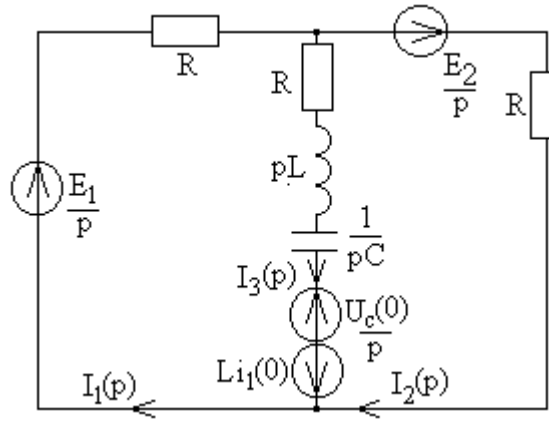


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \quad i_{2\text{дк}} = 0.8$$

$$i_{3\text{дк}} := 0 \quad u_{L\text{дк}} := 0$$

$$u_{C\text{дк}} := E_1 - i_{1\text{дк}} \cdot R \quad u_{C\text{дк}} = 30$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{3\text{дк}} \quad i_{L0} = 0$$

$$u_{C0} = 30$$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) - I_{k2}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + I_{k2}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0}$$

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (7500.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 10.0 \cdot p^2)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(6.0000 \cdot 10^5 + 12.0 \cdot p^2 + 8000. \cdot p)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} \end{vmatrix} \quad \Delta_2(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(6.0000 \cdot 10^5 + 12.0 \cdot p^2 + 10000. \cdot p)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(6.0000 \cdot 10^5 + 12.0 \cdot p^2 + 8000 \cdot p)}{p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 10.0 \cdot p^2)}^1.$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float},5 \rightarrow \frac{(6.0000 \cdot 10^5 + 12.0 \cdot p^2 + 10000 \cdot p)}{p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 10.0 \cdot p^2)}^1.$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float},5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-200.}{(750. \cdot p + p^2 + 50000.)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow 10 \cdot \frac{(2250 \cdot p + 3 \cdot p^2 + 50000)}{(750 \cdot p + p^2 + 50000) \cdot p}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_3(p) - L \cdot i_{3\text{дк}}$$

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow -20 \cdot \frac{p}{(750 \cdot p + p^2 + 50000)}$$

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

$$N_1(p) := 6.0000 \cdot 10^5 + 12.0 \cdot p^2 + 8000 \cdot p \quad M_1(p) := p \cdot (7500.0 \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 10.0 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve},p \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -676.04 \\ -73.960 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -676.04$$

$$p_2 = -73.96$$

$$N_1(p_0) = 6 \times 10^5$$

$$N_1(p_1) = 6.76 \times 10^5$$

$$N_1(p_2) = 7.396 \times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow 15000. \cdot p + 5.0000 \cdot 10^5 + 30. \cdot p^2.$$

$$dM_1(p_0) = 5 \times 10^5$$

$$dM_1(p_1) = 4.07 \times 10^6$$

$$dM_1(p_2) = -4.453 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float},3 \rightarrow 1.20 + .166 \cdot \exp(-676. \cdot t) - .166 \cdot \exp(-74.0 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі $U_C(p)$:

$$N_u(p) := 10 \cdot (2250 \cdot p + 3 \cdot p^2 + 50000)$$

$$M_u(p) := p \cdot (750 \cdot p + p^2 + 50000)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve},p \\ \text{float},5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -73.95 \\ -676.05 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -73.95$$

$$p_2 = -676.05$$

$$N_u(p_0) = 5 \times 10^5$$

$$N_u(p_1) = -9.998 \times 10^5$$

$$N_u(p_2) = -9.998 \times 10^5$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 1500 \cdot p + 3 \cdot p^2 + 50000$$

$$dM_u(p_0) = 5 \times 10^4$$

$$dM_u(p_1) = -4.452 \times 10^4$$

$$dM_u(p_2) = 4.071 \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 30.002$$

$$u_C(t) \text{ float, 5} \rightarrow 10. + 22.458 \cdot \exp(-73.95 \cdot t) - 2.4562 \cdot \exp(-676.05 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := -20 \cdot p$$

$$M_L(p) := 750 \cdot p + p^2 + 50000$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -73.95 \\ -676.05 \end{pmatrix} \quad p_1 = -73.95 \quad p_2 = -676.05$$

$$N_L(p_1) = 1.479 \times 10^3$$

$$N_L(p_2) = 1.352 \times 10^4$$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 750 + 2 \cdot p$$

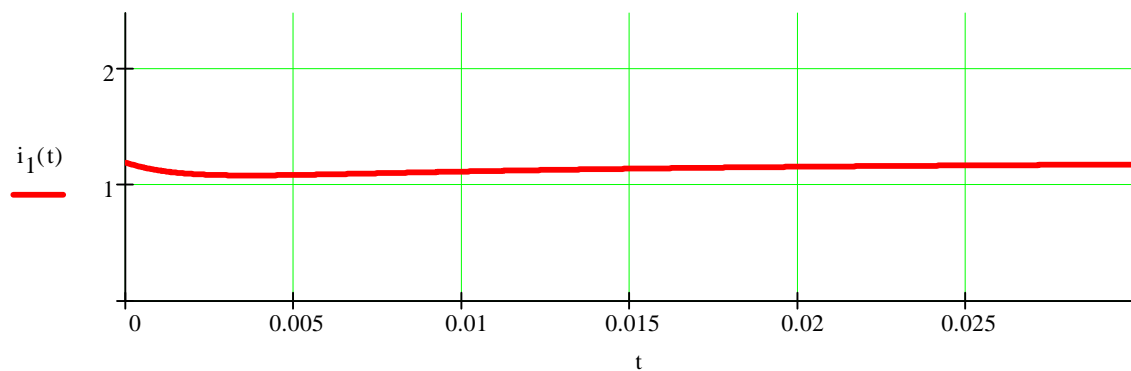
$$dM_L(p_1) = 602.1$$

$$dM_L(p_2) = -602.1$$

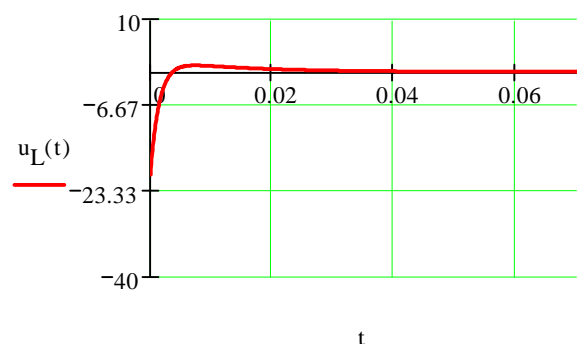
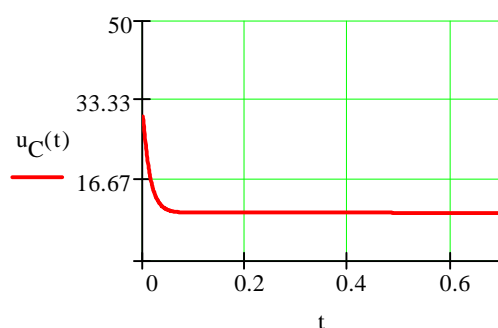
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = -20$$

$$u_L(t) \text{ float, 5} \rightarrow 2.4564 \cdot \exp(-73.95 \cdot t) - 22.456 \cdot \exp(-676.05 \cdot t)$$



Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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

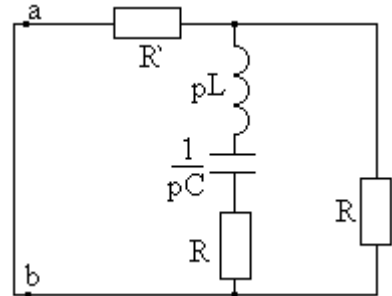
$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R\right) \cdot \mathbf{R'} + \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R}$$

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + R^2\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L + R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -32.725 \\ -4.7746 \end{pmatrix}$$



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:

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

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

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

$$X_C = 50$$

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

$$X_L = 10$$

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

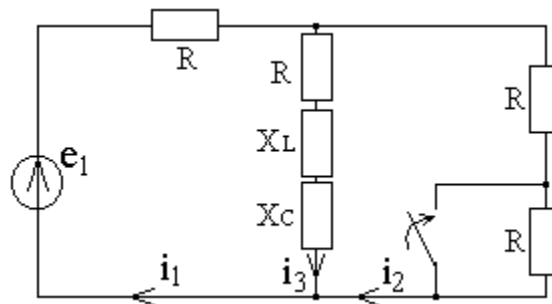
$$E_1 = -60.622 - 35i$$

$$F(E_1) = (70 \quad -150)$$

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

$$E_2 = -43.301 - 25i$$

$$F(E_2) = (50 \quad -150)$$



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

$$Z'_{vx} = 87.759 - 16.598i$$

$$\Gamma_{1\text{дк}} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$$

$$\Gamma_{1\text{дк}} = -0.594 - 0.511i$$

$$F(\Gamma_{1\text{дк}}) = (0.784 \quad -139.29)$$

$$\Gamma_{2\text{дк}} := \Gamma_{1\text{дк}} \cdot \frac{(R + X_L \cdot i - i \cdot X_C)}{2 \cdot R + R + X_L \cdot i - i \cdot X_C}$$

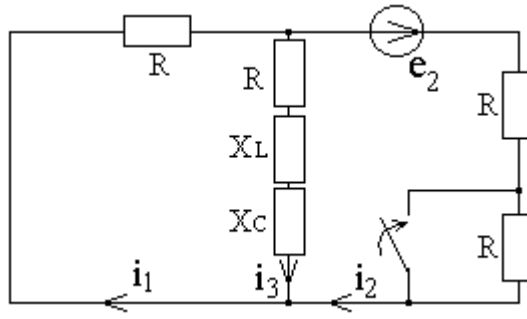
$$\Gamma_{2\text{дк}} = -0.309 - 0.094i$$

$$F(\Gamma_{2\text{дк}}) = (0.323 \quad -163.019)$$

$$\Gamma_{3\text{дк}} := \Gamma_{1\text{дк}} - \Gamma_{2\text{дк}}$$

$$\Gamma_{3\text{дк}} = -0.285 - 0.417i$$

$$F(\Gamma_{3\text{дк}}) = (0.505 \quad -124.359)$$



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

$$Z''_{vx} = 128.448 - 8.621i$$

$$I''_{2dk} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$$

$$I''_{2dk} = -0.323 - 0.216i$$

$$F(I''_{2dk}) = (0.388 \quad -146.16)$$

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

$$I''_{1dk} = -0.221 - 0.067i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.231 \quad -163.019)$$

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

$$I''_{3dk} = -0.102 - 0.149i$$

$$F(I''_{3dk}) = (0.18 \quad -124.359)$$

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

$$I_{1dk} = -0.815 - 0.579i$$

$$F(I_{1dk}) = (0.999 \quad -144.625)$$

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

$$I_{2dk} = -0.632 - 0.311i$$

$$F(I_{2dk}) = (0.704 \quad -153.813)$$

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

$$I_{3dk} = -0.183 - 0.268i$$

$$F(I_{3dk}) = (0.325 \quad -124.359)$$

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

$$u_{Cdk} = -13.396 + 9.158i$$

$$F(u_{Cdk}) = (16.227 \quad 145.641)$$

$$u_{Ldk} := I_{3dk} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{Ldk} = 2.679 - 1.832i$$

$$F(u_{Ldk}) = (3.245 \quad -34.359)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = 12.952$$

$$i_{Ldk}(0) = -0.379$$

Given

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

$$e_1(0) = u_{L0} + i_{10} \cdot R + u_{C0} + i_{30} \cdot R$$

$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0} - u_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0})$$

$$i_{10} = -1.038$$

$$i_{20} = -0.659$$

$$i_{30} = -0.379$$

$$u_{L0} = 8.394$$

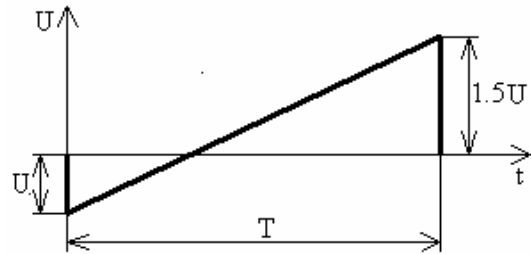
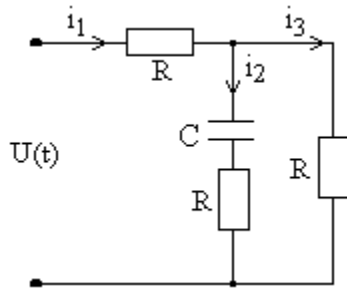
$$u_{C0} = 12.952$$

Інтеграл Дюамеля

$$T := 1.5$$

$$E_1 := 70$$

$$E := 1$$



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: $t = \infty$

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

$$i'_1 = 0.01$$

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

$$i'_3 = 0.01$$

$$i'_2 := 0$$

$$i'_2 = 0$$

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

$$u'_C = 0.5$$

Незалежні початкові умови

$$u_{\text{C0}} := u_{\text{Cдк}}$$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

$$0 = u_{\text{C0}} + i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R$$

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

$$i_{10} = 0.013 \quad i_{20} = 6.667 \times 10^{-3} \quad i_{30} = 6.667 \times 10^{-3}$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z_{\text{vx}}(p) := R + \frac{R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R \right)}{2R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$Z_{\text{vx}}(p) := \frac{R \cdot \left(2R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R \right)}{2R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$p := R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R \right) \Bigg|_{\text{solve}, p}^{\text{float}, 5} \rightarrow -66.667$$

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

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -66.667$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

$$i''_2(t) = B_1 \cdot e^{pt}$$

Визначення сталих інтегрування:

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

$$B_1 := i_{20} - i'_2 \quad B_1 = 6.667 \times 10^{-3}$$

Отже вільна складова струму $i_1(t)$ та $i_2(t)$ будуть мати вигляд:

$$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{pt} \quad i''_2(t) := B_1 \cdot e^{pt}$$

Повні значення цих струмів:

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad i_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-66.667 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \quad i_2(t) \text{ float,5} \rightarrow -6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-66.667 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-66.667 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := \frac{1}{C} \cdot \int i_2(t) dt \text{ float,5} \rightarrow .50000 \cdot \exp(-66.667 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := -E_1 \quad U_0 = -70$$

$$U_1(t) := U_0 + \frac{2.5E_1}{T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow -70. + 7777.8 \cdot t \quad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 7777.8 \quad U'_2 := 0$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -311 - .622 \cdot \exp(-66.7 \cdot t) + 77.8 \cdot t$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau + (U_2 - 1.5E_1) \cdot g_{11}(t - T)$$

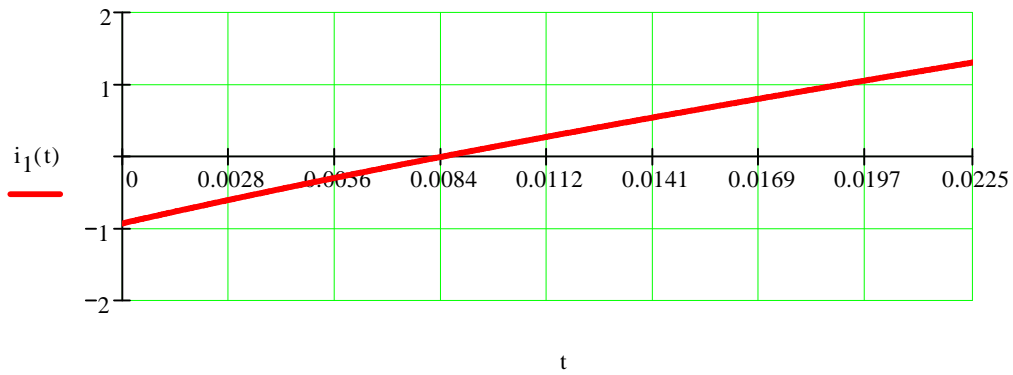
$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -3.75 \cdot 10^{-6} - .622 \cdot \exp(-66.7 \cdot t) + 3.89 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-66.7 \cdot t + 1.50)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

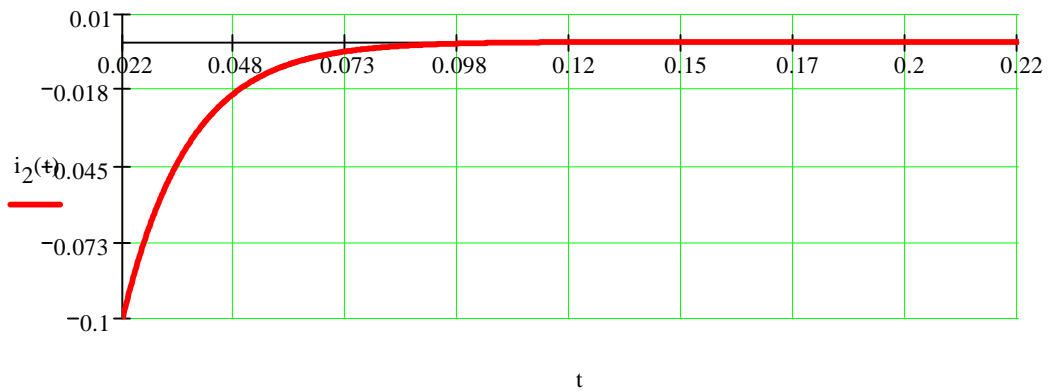
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,4} \rightarrow -93.33 \cdot \exp(-66.67 \cdot t) \cdot t + .8750 - .8750 \cdot \exp(-66.67 \cdot t)$$

$$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau + (U_2 - 1.5E_1) \cdot h_{cU}(t - T)$$

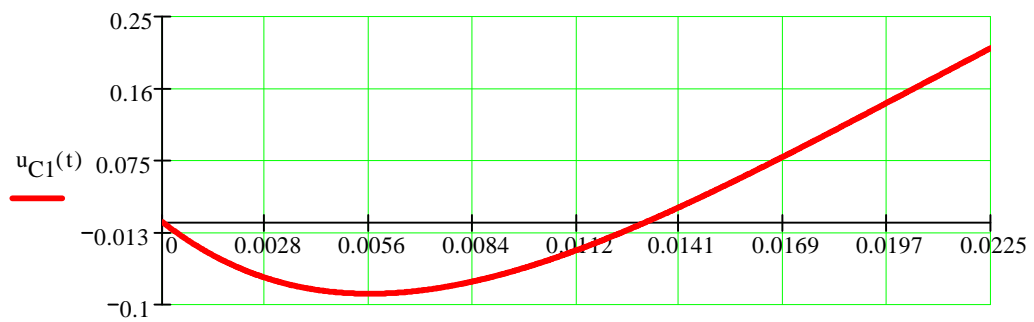
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \leq t \leq T$



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



$0 \leq t \leq T$



$T \leq t \leq \infty$

