

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 416

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.

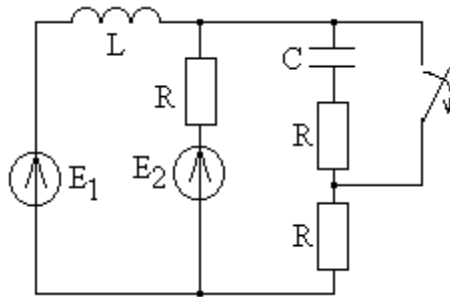
3. В післякомутаційній схемі замкнути джерело ЕДС E_2 .

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:

$$L := 0.15 \quad \text{Гн} \quad C := 700 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ф}$$

$$R := 50 \quad \text{Ом}$$

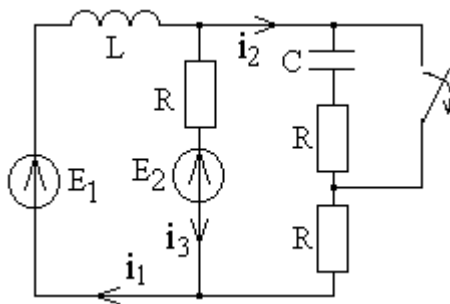
$$E_1 := 90 \quad \text{В} \quad E_2 := 60 \quad \text{В}$$

$$\psi := 45 \cdot \text{deg} \quad \text{C}^0$$

$$\omega := 200 \quad \text{с}^{-1}$$

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

Given

$$i_{1\text{ДК}} = i_{2\text{ДК}} + i_{3\text{ДК}}$$

$$E_1 - E_2 = i_{3\text{ДК}} \cdot R$$

$$E_2 = -i_{3\text{ДК}} \cdot R + i_{2\text{ДК}} \cdot R$$

$$\begin{pmatrix} i_{1\text{ДК}} \\ i_{2\text{ДК}} \\ i_{3\text{ДК}} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{1\text{ДК}}, i_{2\text{ДК}}, i_{3\text{ДК}}) \text{ float}, 5 \rightarrow \begin{pmatrix} 2.4000 \\ 1.8000 \\ .60000 \end{pmatrix}$$

$$i_{1\text{ДК}} = 2.4$$

$$i_{2\text{ДК}} = 1.8$$

$$i_{3\text{ДК}} = 0.6$$

$$u_{\text{CDK}} := 0$$

$$u_{\text{LDK}} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 - E_2}{R}$$

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

$$i'_3 = 0.6$$

$$i'_2 := 0$$

$$u'_L := 0$$

$$u'_C := E_1$$

$$u'_C = 90$$

Незалежні початкові умови

$$i_{10} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{10} = 2.4$$

$$u_{C0} := u_{\text{CDK}} \quad u_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E_1 - E_2 = u_{L0} + i_{30} \cdot R$$

$$E_2 = i_{20} \cdot 2 \cdot R - i_{30} \cdot R + u_{C0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$$i_{30} = 1.2$$

$$i_{20} = 1.2$$

$$u_{L0} = -30$$

Незалежні початкові умови

$$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = -200$$

$$du_{C0} := \frac{i_{20}}{C} \quad du_{C0} = 1.714 \times 10^3$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$$0 = di_{20} \cdot 2 \cdot R - di_{30} \cdot R + du_{C0}$$

$$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0})$$

$$di_{20} = -78.095 \quad di_{30} = -121.905 \quad du_{L0} = 6.095 \times 10^3$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z(p) := \frac{R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right)}{3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}} + p \cdot L$$

$$Z(p) := \frac{R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot p \cdot L}{3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}}$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) + \left(3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot p \cdot L \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -217.12 \\ -14.621 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -217.12$$

$$p_2 = -14.621$$

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

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

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

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

$$A_1 = 0.858$$

$$A_2 = 0.942$$

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

$$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float, } 5 \rightarrow .85769 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) + .94231 \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float, } 5 \rightarrow .60000 + .85769 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) + .94231 \cdot \exp(-14.621 \cdot t) \quad i_1(0) = 2.4$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = 0.299 \quad B_2 = 0.901$$

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

$$i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float, 5} \rightarrow .29901 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) + .90099 \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float, 5} \rightarrow .29901 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) + .90099 \cdot \exp(-14.621 \cdot t) \quad i_2(0) = 1.2$$

Given

$$i_{30} - i'_3 = C_1 + C_2$$

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 0.559 \quad C_2 = 0.041$$

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

$$i''_3(t) := C_1 \cdot e^{p_1 t} + C_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float, 5} \rightarrow .55868 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) + 4.1320 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float, 5} \rightarrow .60000 + .55868 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) + 4.1320 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-14.621 \cdot t) \quad i_3(0) = 1.2$$

Given

$$u_{C0} - u'_C = D_1 + D_2$$

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -1.967 \quad D_2 = -88.033$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D_1 \cdot e^{p_1 t} + D_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float, 6} \rightarrow -1.96740 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) - 88.0326 \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float, 5} \rightarrow 90. - 1.9674 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) - 88.033 \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

Given

$$u_{L0} - u'_L = F_1 + F_2$$

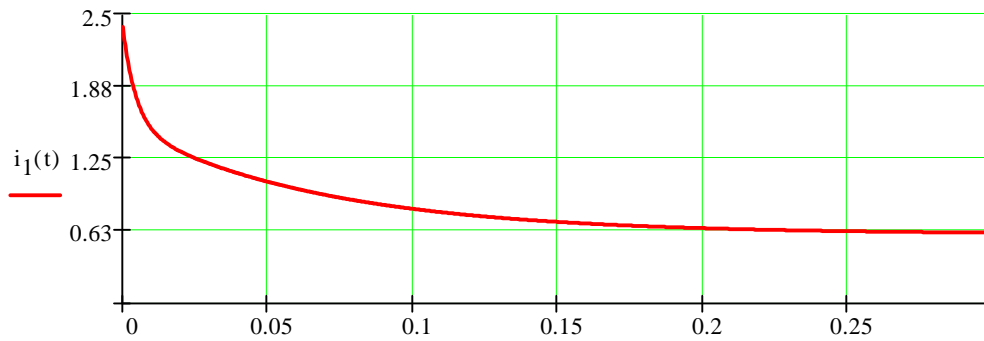
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = -27.934 \quad F_2 = -2.066$$

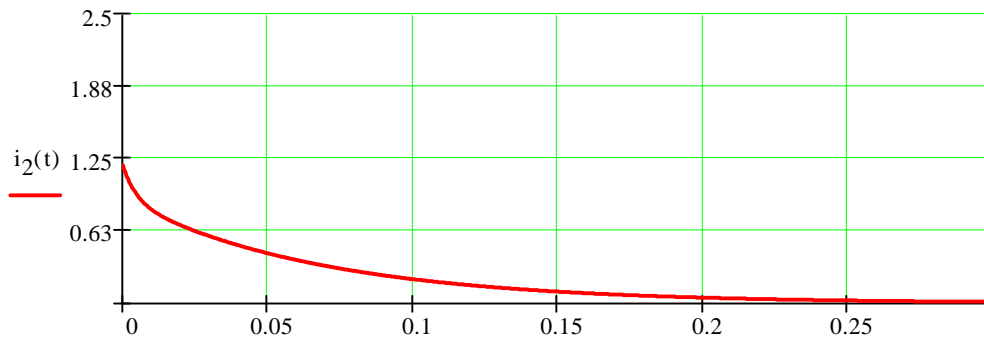
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 t} + F_2 \cdot e^{p_2 t} \text{ float, 5} \rightarrow -27.934 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) - 2.0660 \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

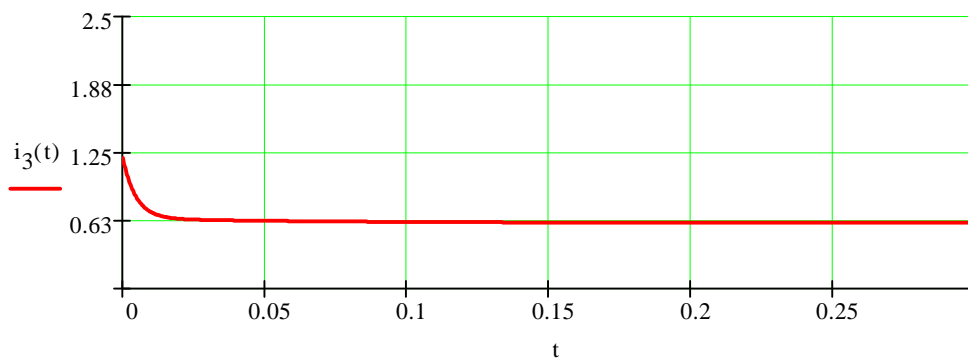
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float, 5} \rightarrow -27.934 \cdot \exp(-217.12 \cdot t) - 2.0660 \cdot \exp(-14.621 \cdot t) \quad u_L(0) = -30$$



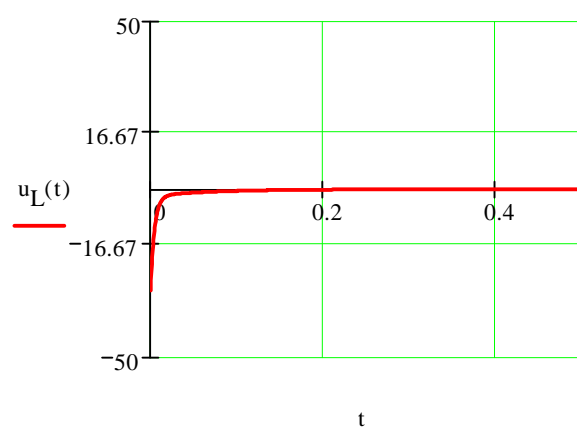
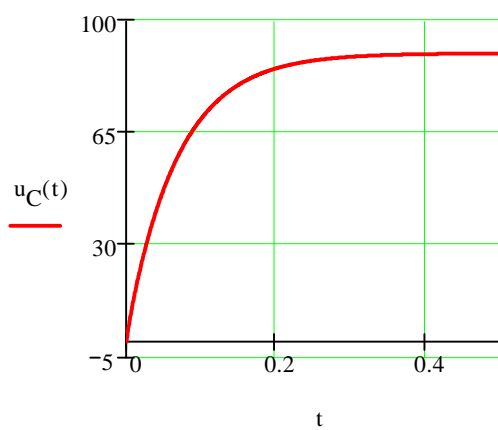
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

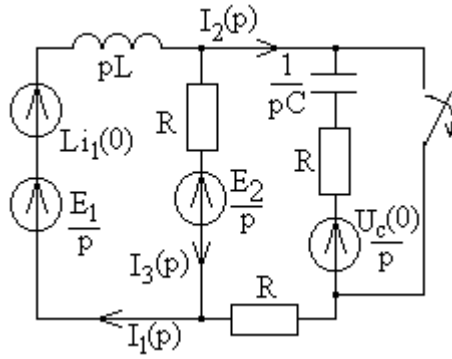


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

Given

$$i_{1\text{ДК}} = i_{2\text{ДК}} + i_{3\text{ДК}}$$

$$E_1 - E_2 = i_{3\text{ДК}} \cdot R$$

$$E_2 = -i_{3\text{ДК}} \cdot R + i_{2\text{ДК}} \cdot R$$

$$\begin{pmatrix} i_{1\text{ДК}} \\ i_{2\text{ДК}} \\ i_{3\text{ДК}} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{1\text{ДК}}, i_{2\text{ДК}}, i_{3\text{ДК}}) \text{ float}, 4 \rightarrow \begin{pmatrix} 2.400 \\ 1.800 \\ .6000 \end{pmatrix}$$

$$i_{1\text{ДК}} = 2.4$$

$$i_{2\text{ДК}} = 1.8$$

$$i_{3\text{ДК}} = 0.6$$

$$u_{\text{CDK}} := 0$$

$$u_{\text{LDK}} := 0$$

Початкові умови:

$$i_{\text{L0}} := i_{1\text{ДК}}$$

$$i_{\text{L0}} = 2.4$$

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

$$I_{k1}(p) \cdot (R + p \cdot L) - I_{k2}(p) \cdot (R) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} + L \cdot i_{\text{L0}}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot (R) + I_{k2}(p) \cdot \left(3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C0}}}{p}$$

$$\Delta(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L & -(R) \\ -(R) & 3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$\Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(5214.3 \cdot p + 71429. + 22.500 \cdot p^2.)}{p^1.}$$

$$\Delta_1(p) := \begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} + L \cdot i_{\text{L0}} & -(R) \\ \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C0}}}{p} & 3 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(8014.3 \cdot p + 42857. + 54.000 \cdot p^2.)}{p^2.}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} + L \cdot i_{\text{L0}} \\ -(R) & \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C0}}}{p} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(4500. + 27.000 \cdot p)}{p^1.}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(8014.3 \cdot p + 42857. + 54.000 \cdot p^2)}{p^1 \cdot (5214.3 \cdot p + 71429. + 22.500 \cdot p^2)}^1.$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(4500. + 27.000 \cdot p)}{(5214.3 \cdot p + 71429. + 22.500 \cdot p^2)}^1.$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{(35143. \cdot p + 428570. + 270. \cdot p^2)}{p \cdot (52143. \cdot p + 714290. + 225. \cdot p^2)}$$

$$u_C(p) := \frac{u_{C0}}{p} + \frac{I_2(p)}{p \cdot C}$$

$$u_C(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 1.2857 \cdot 10^5 \cdot \frac{(500. + 3. \cdot p)}{(52143. \cdot p + 7.1429 \cdot 10^5 + 225. \cdot p^2)}^1 \cdot p^1.$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_1(p) - L \cdot i_{1\text{дк}}$$

$$u_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow -3.0000 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(2.2500 \cdot 10^5 \cdot p + 6.4286 \cdot 10^6)}{(52143. \cdot p + 7.1429 \cdot 10^5 + 225. \cdot p^2)}^1.$$

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

$$N_1(p) := 8014.3 \cdot p + 42857. + 54.000 \cdot p^2 \quad M_1(p) := p \cdot (5214.3 \cdot p + 71429. + 22.500 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 10 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -217.1255291 \\ -14.62113753 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -217.126$$

$$p_2 = -14.621$$

$$N_1(p_0) = 4.286 \times 10^4 \quad N_1(p_1) = 8.485 \times 10^5 \quad N_1(p_2) = -6.278 \times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 10429. \cdot p + 71429. + 67.500 \cdot p^2.$$

$$dM_1(p_0) = 7.143 \times 10^4 \quad dM_1(p_1) = 9.892 \times 10^5 \quad dM_1(p_2) = -6.662 \times 10^4$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 3 \rightarrow .600 + .858 \cdot \exp(-217. \cdot t) + .942 \cdot \exp(-14.6 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі $U_c(p)$:

$$N_u(p) := 1.2857 \cdot 10^5 \cdot (500. + 3. \cdot p) \quad M_u(p) := p \cdot (52143. \cdot p + 7.1429 \cdot 10^5 + 225. \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 45 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -217.12552913942711681 \\ -14.621137527239549856 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -217.126$$

$$p_2 = -14.621$$

$$N_u(p_0) = 6.428 \times 10^7 \quad N_u(p_1) = -1.946 \times 10^7 \quad N_u(p_2) = 5.865 \times 10^7$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 104286 \cdot p + 714290 + 675 \cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 7.143 \times 10^5 \quad dM_u(p_1) = 9.893 \times 10^6 \quad dM_u(p_2) = -6.662 \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 1.421 \times 10^{-14}$$

$$u_C(t) \text{ float, 5} \rightarrow 89.998 - 1.9673 \cdot \exp(-217.13 \cdot t) - 88.031 \cdot \exp(-14.621 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := -3.0000 \cdot 10^{-2} \cdot (2.2500 \cdot 10^5 \cdot p + 6.4286 \cdot 10^6) \quad M_L(p) := 52143 \cdot p + 7.1429 \cdot 10^5 + 225 \cdot p^2$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 10} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -217.1255291 \\ -14.62113753 \end{pmatrix} \quad p_1 = -217.126 \quad p_2 = -14.621$$

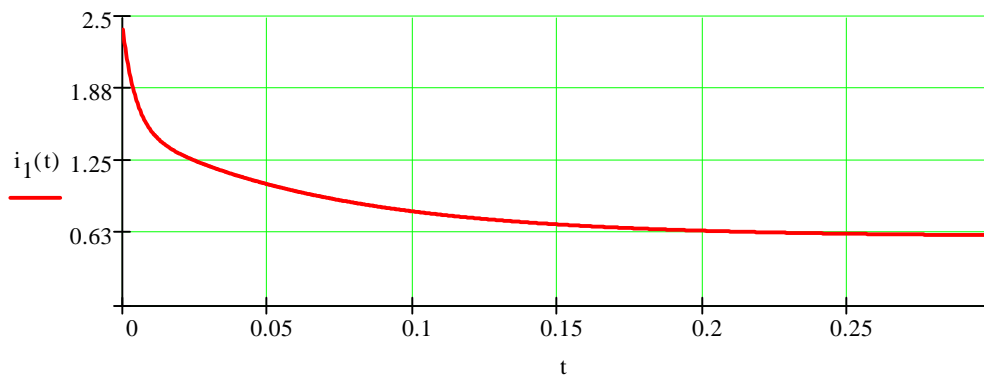
$$N_L(p_1) = 1.273 \times 10^6 \quad N_L(p_2) = -9.417 \times 10^4$$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 52143 + 450 \cdot p$$

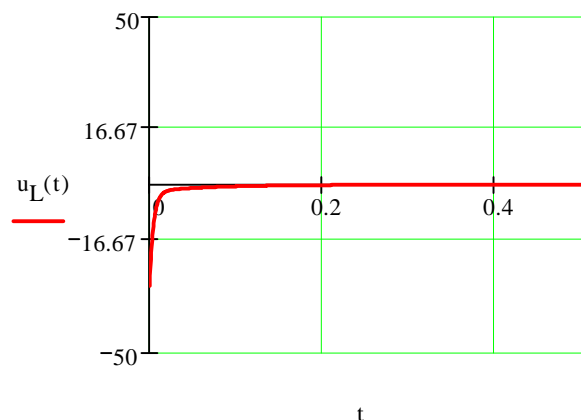
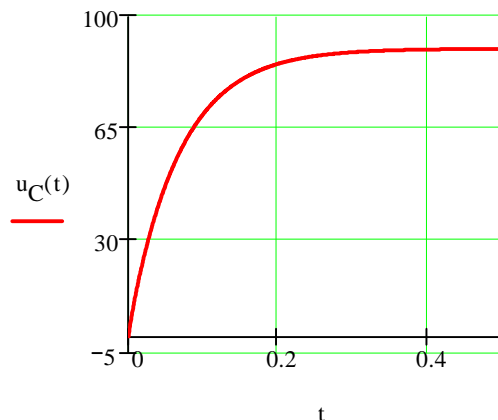
$$dM_L(p_1) = -4.556 \times 10^4 \quad dM_L(p_2) = 4.556 \times 10^4$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = -30$$



Графік перехідного струму $i_L(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

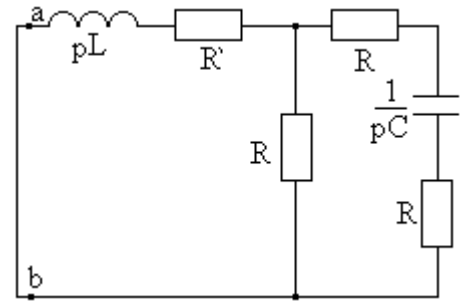
$$Z_{ab}(p) := \mathbf{R'} + p \cdot L + \frac{\left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R}$$

$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R\right) \cdot (\mathbf{R'} + p \cdot L) + \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R + R}$$

$$(3 \cdot R \cdot L) \cdot p^2 + \left(3 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + 2 \cdot R^2\right) \cdot p + \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$$\left(3 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + 2 \cdot R^2\right)^2 - 4 \cdot (3 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0 \quad D = 0$$

$$\left(3 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + 2 \cdot R^2\right)^2 - 4 \cdot (3 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -41.664 \\ -22.146 \end{pmatrix}$$



В схемі з даними параметрами перехід з аперіодичного процесу у коливальний не можливий.

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:

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

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

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

$$X_C = 7.143$$

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

$$X_L = 30$$

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

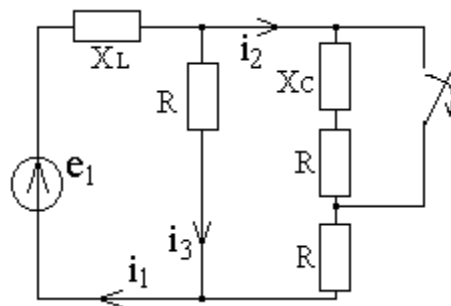
$$E_1 = 63.64 + 63.64i$$

$$F(E_1) = (90 \ 45)$$

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

$$E_2 = 42.426 + 42.426i$$

$$F(E_2) = (60 \ 45)$$



$$Z'_{vX} := i \cdot X_L + \frac{R \cdot R}{R + R}$$

$$Z'_{vX} = 25 + 30i$$

$$\Gamma'_{1\text{дк}} := \frac{E_1}{Z'_{vX}}$$

$$\Gamma'_{1\text{дк}} = 2.295 - 0.209i$$

$$F(\Gamma'_{1\text{дк}}) = (2.305 \ -5.194)$$

$$\Gamma'_{2\text{дк}} := \Gamma'_{1\text{дк}} \cdot \frac{R}{R + R}$$

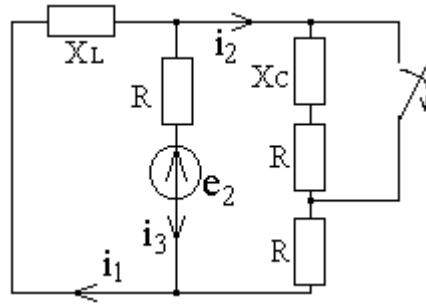
$$\Gamma'_{2\text{дк}} = 1.148 - 0.104i$$

$$F(\Gamma'_{2\text{дк}}) = (1.152 \ -5.194)$$

$$\Gamma'_{3\text{дк}} := \Gamma'_{1\text{дк}} - \Gamma'_{2\text{дк}}$$

$$\Gamma'_{3\text{дк}} = 1.148 - 0.104i$$

$$F(\Gamma'_{3\text{дк}}) = (1.152 \ -5.194)$$



$$Z''_{vX} := R + \frac{i \cdot X_L \cdot R}{R + i \cdot X_L}$$

$$Z''_{vX} = 63.235 + 22.059i$$

$$I''_{3DK} := \frac{E_2}{Z''_{vX}}$$

$$I''_{3DK} = 0.807 + 0.389i$$

$$F(I''_{3DK}) = (0.896 \quad 25.769)$$

$$I''_{1DK} := I''_{3DK} \cdot \frac{R}{R + i \cdot X_L}$$

$$I''_{1DK} = 0.765 - 0.07i$$

$$F(I''_{1DK}) = (0.768 \quad -5.194)$$

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

$$I''_{2DK} = 0.042 + 0.459i$$

$$F(I''_{2DK}) = (0.461 \quad 84.806)$$

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

$$I_{1DK} = 3.06 - 0.278i$$

$$F(I_{1DK}) = (3.073 \quad -5.194)$$

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

$$I_{2DK} = 1.189 + 0.355i$$

$$F(I_{2DK}) = (1.241 \quad 16.607)$$

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

$$I_{3DK} = 0.341 - 0.494i$$

$$F(I_{3DK}) = (0.6 \quad -55.389)$$

$$u_{CDK} := I_{3DK} \cdot (-i \cdot X_C)$$

$$u_{CDK} = -3.527 - 2.434i$$

$$F(u_{CDK}) = (4.286 \quad -145.389)$$

$$u_{LDK} := I_{1DK} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{LDK} = 8.346 + 91.808i$$

$$F(u_{LDK}) = (92.187 \quad 84.806)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{CDK}(0) = -3.443$$

$$i_{LDK}(0) = -0.393$$

Given

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

$$e_1(0) - e_2(0) = u_{L0} + i_{30} \cdot R$$

$$e_2(0) = i_{20} \cdot 2 \cdot R - i_{30} \cdot R + u_{C0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0})$$

$$i_{10} = -0.393$$

$$i_{20} = 0.292$$

$$i_{30} = -0.685$$

$$u_{L0} = 64.262$$

$$u_{C0} = -3.443$$

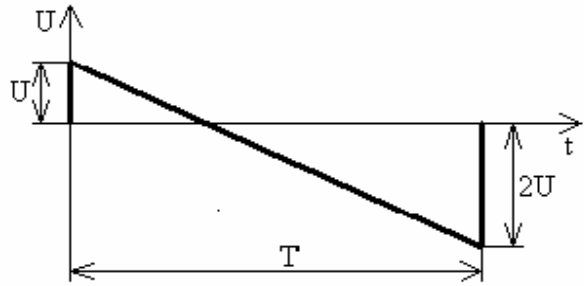
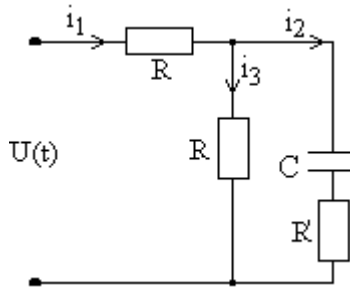
Інтеграл Дюамеля

$$T := 0.9$$

$$E_1 := 90$$

$$E := 1$$

$$R' := 2R$$



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

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

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

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

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

$$i_{10} = 0.012$$

$$i_{20} = 4 \times 10^{-3}$$

$$i_{30} = 8 \times 10^{-3}$$

Вільний режим після комутації: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

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

$$p := R \cdot \left(R + R' + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R' \right) \Bigg|_{\text{solve}, p} \rightarrow -11.429 \quad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \quad T = 0.079$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -11.429$$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$$A_1 := i_{10} - i'_1 \quad A_1 = 2 \times 10^{-3}$$

Отже: $i''_1(t) := A_1 \cdot e^{pt}$

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 2.0000 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-11.429 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot (1 - e^{pt}) \text{ float,5} \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-11.429 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := E_1 \quad U_0 = 90$$

$$U_1(t) := U_0 - \frac{3E_1}{T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 90. - 3428.7 \cdot t \quad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow -3428.7$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow .300 + .780 \cdot \exp(-11.4 \cdot t) - 34.3 \cdot t$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau + (U_2 + 2E_1) \cdot g_{11}(t - T)$$

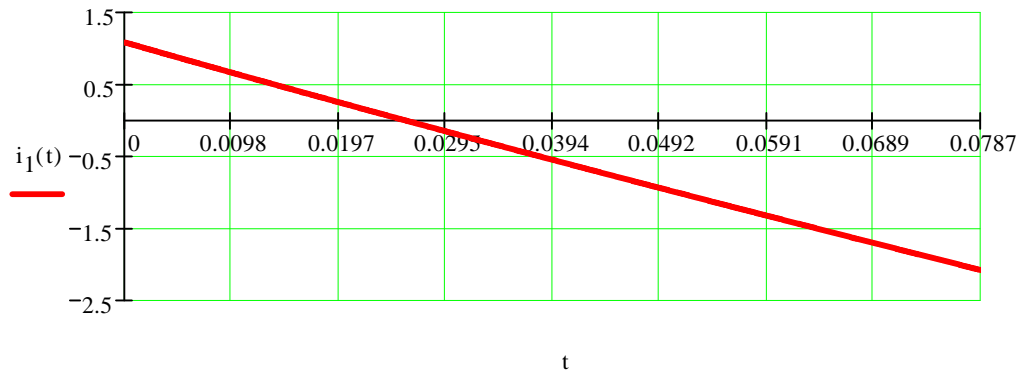
$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow .780 \cdot \exp(-11.4 \cdot t) - .240 \cdot \exp(-11.4 \cdot t + .900)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

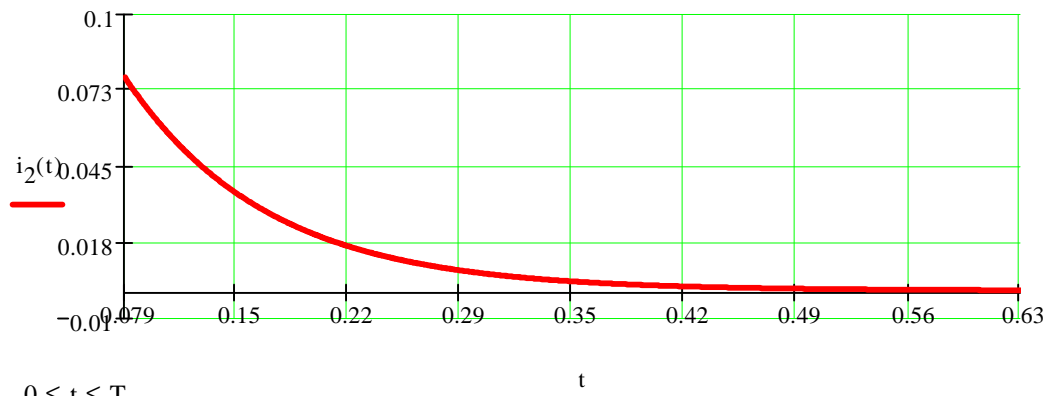
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,4} \rightarrow 195.0 - 195.0 \cdot \exp(-11.43 \cdot t) - 1714. \cdot t$$

$$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau + (U_2 + 2E_1) \cdot h_{cU}(t - T)$$

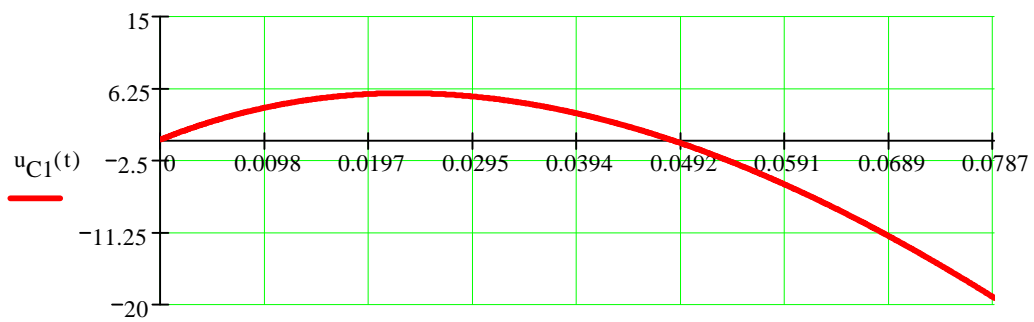
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \leq t \leq T$



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



$0 \leq t \leq T$



$T \leq t \leq \infty$

