

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

***Розрахунково-графічна робота***

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 204

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.

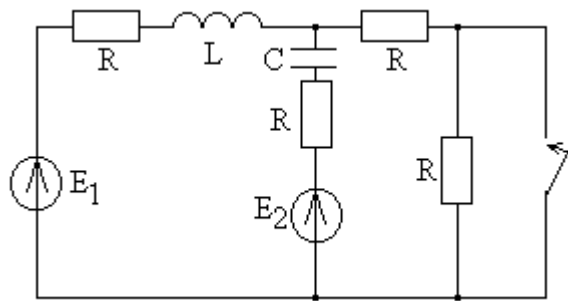
3. В післякомутаційній схемі замкнути джерело ЕДС  $E_2$ .

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  $\tau$ ;

г) побудувати в одному часовому масштабі діаграми напруги на вході, вхідного струму і напруги на реактивних елементах.



Основна схема

Вхідні данні:

$$L := 0.1 \quad \text{Гн} \quad C := 100 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ф}$$

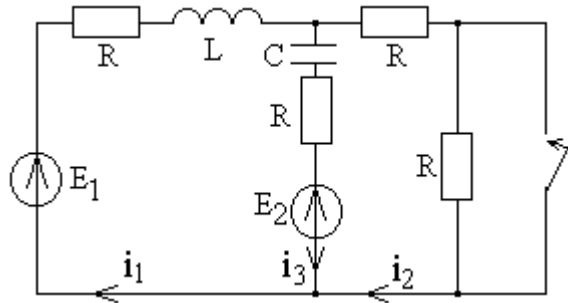
$$R := 50 \quad \text{Ом}$$

$$E_1 := 100 \quad \text{В} \quad E_2 := 80 \quad \text{В}$$

$$\psi := 30 \cdot \text{deg} \quad C^0 \quad \omega := 100 \quad \text{с}^{-1}$$

## Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 0.667$$

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

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - E_2 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = -13.333$$

Усталений режим після комутації:  $t = \infty$

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

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

$$u'_C := E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R \quad u'_C = -30$$

Незалежні початкові умови

$$i_{10} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{10} = 0.667$$

$$u_{C0} := u_{C\text{ДК}} \quad u_{C0} = -13.333$$

Залежні початкові умови

Given

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

$$E_1 - E_2 = u_{L0} + u_{C0} + i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R$$

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

$$\begin{pmatrix} i_{30} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{30}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float, 6} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.333333 \\ 1. \\ 16.6667 \end{pmatrix}$$

$$i_{30} = -0.333 \quad i_{20} = 1 \quad u_{L0} = 16.667$$

Незалежні початкові умови

$$di_{10} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{10} = 166.667$$

$$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = -3.333 \times 10^3$$

## Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{20} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{20}, di_{30}, du_{L0}) \quad di_{20} = 50 \quad di_{30} = 116.667 \quad du_{L0} = -1.083 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left( 2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot (p \cdot L + R) \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -708.95 \\ -141.05 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -708.95$$

$$p_2 = -141.05$$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = -0.211 \quad A_2 = -0.123$$

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

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad \text{float, } 7 \rightarrow 1. - .2106891 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - .1226442 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) \quad i_1(0) = 0.667$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -0.088 \quad B_2 = 0.088$$

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

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

$$i_2(t) := i_2' + i_2''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1. - 8.804402 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 8.804402 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-141.05 \cdot t) i_2(0) = 1$$

Given

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

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

$$di_{30} = 116.667$$

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = -0.123 \quad C_2 = -0.211$$

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

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

$$i_3(t) := i_3' + i_3''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -0.1226451 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - 0.2106879 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) i_3(0) = -0.333$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = 1.73 \quad D_2 = 14.937$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u_C' + u_C''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -30. + 1.730052 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 14.93661 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) u_C(0) = -13.333$$

Given

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

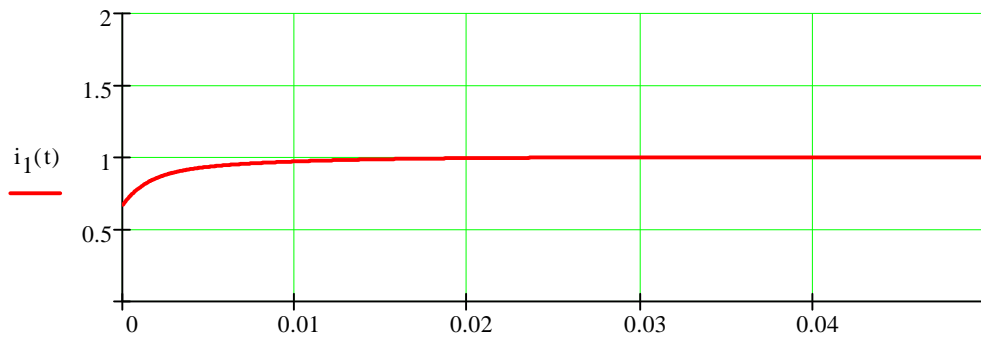
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = 14.937 \quad F_2 = 1.73$$

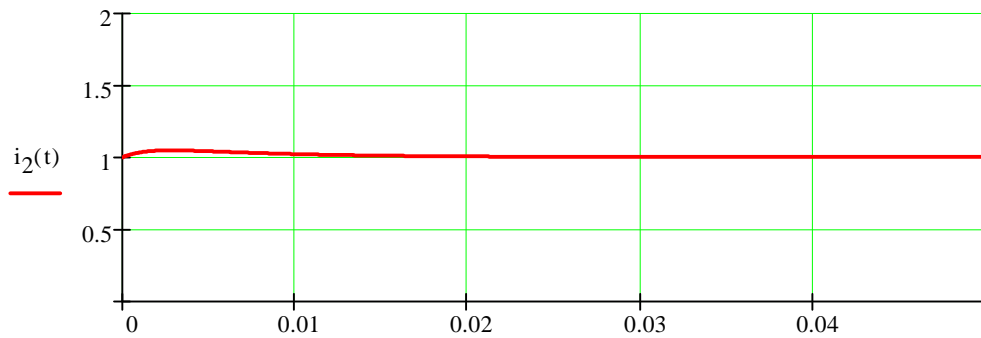
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

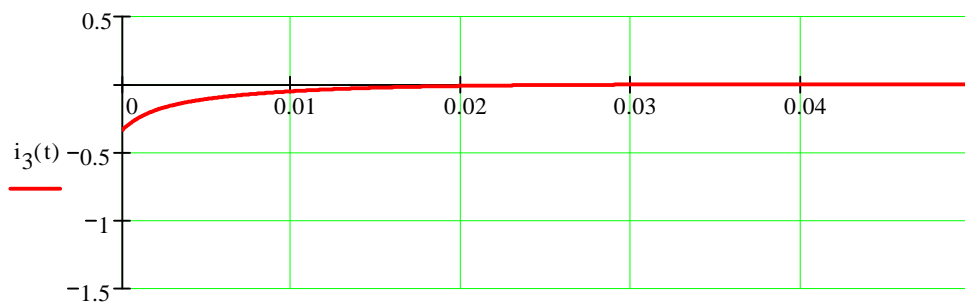
$$u_L(t) := u_L' + u_L''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 14.93665 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) + 1.730053 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) u_L(0) = 16.667$$



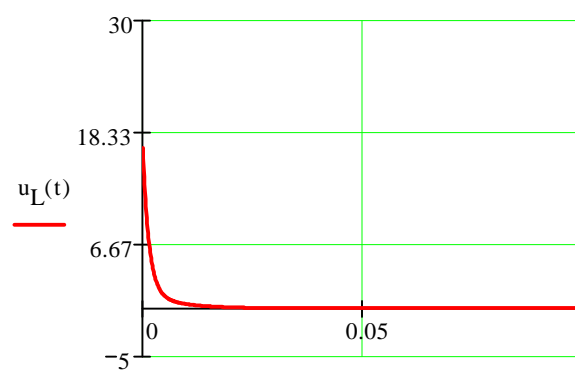
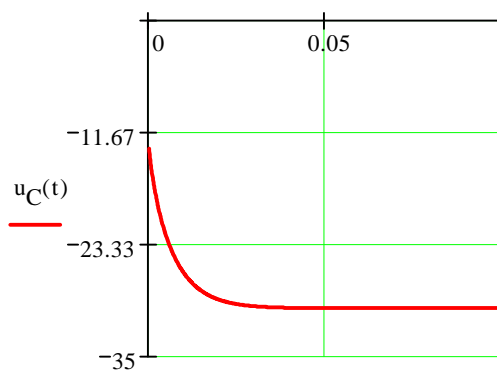
Графік перехідного струму  $i_1(t)$ .



Графік перехідного струму  $i_2(t)$ .

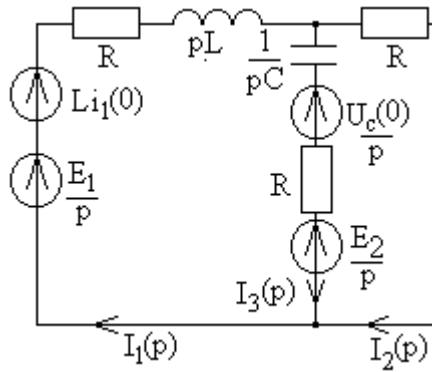


Графік перехідного струму  $i_3(t)$ .



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

## Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 0.667$$

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

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - E_2 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = -13.333$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{L0} = 0.667$$

$$u_{C0} = -13.333$$

$$I_{k1}(p) \cdot \left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R \right) - I_{k2}(p) \cdot \left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10}$$

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

$$\Delta(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R & -\left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (10.0 \cdot p^2 + 8500.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} & -\left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} & \frac{1}{p \cdot C} + 2 \cdot R \end{bmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(7333.3 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 6.6667 \cdot p^2)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{bmatrix} R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} + R & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{10} \\ -\left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_2(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(10.000 \cdot p^2 + 9000.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_{k1}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(7333.3 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 6.6667 \cdot p^2)}{p^1 \cdot (10.0 \cdot p^2 + 8500.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6)}^1.$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_{k2}(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(10.000 \cdot p^2 + 9000.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6)}{p^1 \cdot (10.0 \cdot p^2 + 8500.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6)}^1.$$

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

$$u_C(p) \left| \begin{array}{l} \text{float,5} \\ \text{factor} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-1}{1000 \cdot p} \cdot \frac{(14666350 \cdot p + 3000000000 + 13333 \cdot p^2)}{(850 \cdot p + 100000 + p^2)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_{k1}(p) - L \cdot i_{1\text{дк}}$$

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{50}{3} \cdot \frac{(p + 200)}{(850 \cdot p + 100000 + p^2)}$$

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

$$N_1(p) := (7333.3 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6 + 6.6667 \cdot p^2) \quad M_1(p) := p^1 \cdot (10.0 \cdot p^2 + 8500.0 \cdot p + 1.0000 \cdot 10^6)^1.$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve,p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -708.95 \\ -141.05 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \quad p_1 = -708.95 \quad p_2 = -141.05$$

$$N_1(p_0) = 1 \times 10^6 \quad N_1(p_1) = -8.482 \times 10^5 \quad N_1(p_2) = 9.827 \times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \text{ factor} \rightarrow 10 \cdot (p + 500) \cdot (3 \cdot p + 200)$$

$$dM_1(p_0) = 1 \times 10^6 \quad dM_1(p_1) = 4.026 \times 10^6 \quad dM_1(p_2) = -8.01 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad i_1(0) = 0.667$$

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float,5} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 1.0000 - .21067 \cdot \exp(-708.95 \cdot t) - .12269 \cdot \exp(-141.05 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі  $U_c(p)$ :

$$N_u(p) := \frac{-1}{1000} \cdot (14666350 \cdot p + 3000000000 + 13333 \cdot p^2) \quad M_u(p) := p \cdot (850 \cdot p + 100000 + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve,p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -141.05 \\ -708.95 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0 \quad p_1 = -68.34$$

$$p_2 = -708.95$$



$$N_u(p_0) = -3 \times 10^6$$

$$N_u(p_1) = -1.197 \times 10^6$$

$$N_u(p_2) = 6.964 \times 10^5$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow (p + 500) \cdot (3 \cdot p + 200)$$

$$dM_u(p_0) = 1 \times 10^5$$

$$dM_u(p_1) = -8.01 \times 10^4$$

$$dM_u(p_2) = 4.026 \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = -13.332$$

$$u_C(t) \begin{cases} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{cases} \rightarrow -30. + 14.939 \cdot \exp(-141.05 \cdot t) + 1.7297 \cdot \exp(-708.95 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{50}{3} \cdot (p + 200)$$

$$M_L(p) := (850 \cdot p + 100000 + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \begin{cases} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} -141.05 \\ -708.95 \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -141.05$$

$$p_2 = -708.95$$

$$N_L(p_1) = 982.5$$

$$N_L(p_2) = -8.483 \times 10^3$$

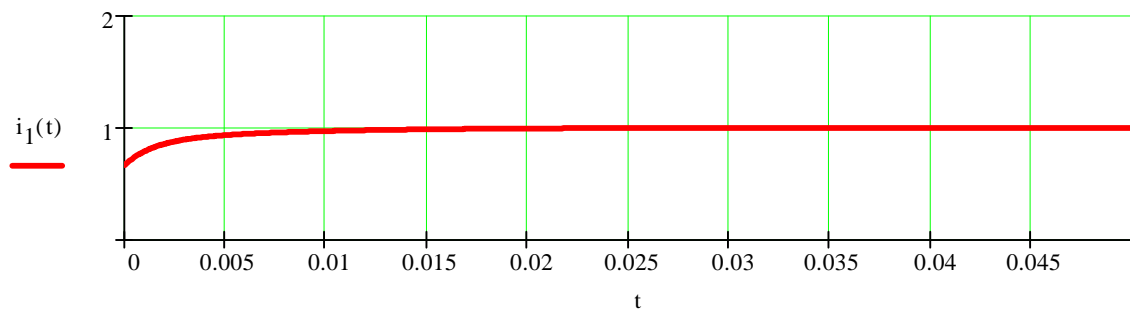
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 850 + 2 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 567.9$$

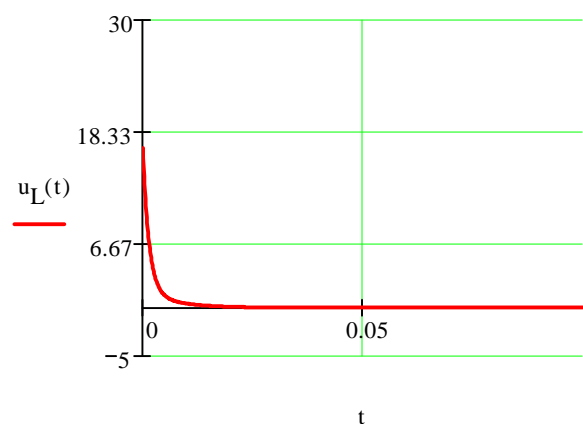
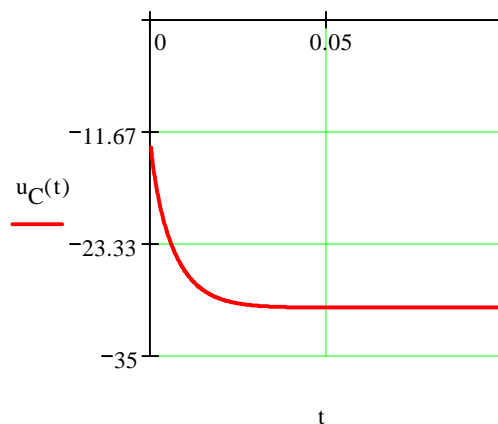
$$dM_L(p_2) = -567.9$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 16.667$$



І графік перехідного струму  $i_1(t)$ .



І графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

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

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

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

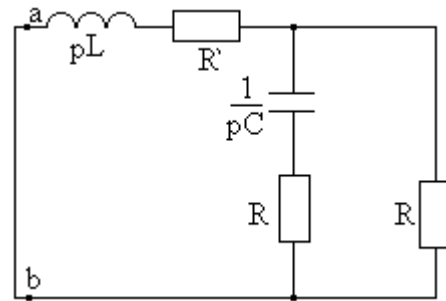
$$(2 \cdot R \cdot L) \cdot p^2 + \left(2 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right) \cdot p + \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$$D = 0$$

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

$$R' := \left(2 \cdot R \cdot R' + \frac{L}{C} + R^2\right)^2 - 4 \cdot (2 \cdot R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -46.623 \\ 16.623 \end{pmatrix}$$

$$R'_{1,0} = 16.623$$



**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:**

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

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

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

$$X_C = 100$$

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

$$X_L = 10$$

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

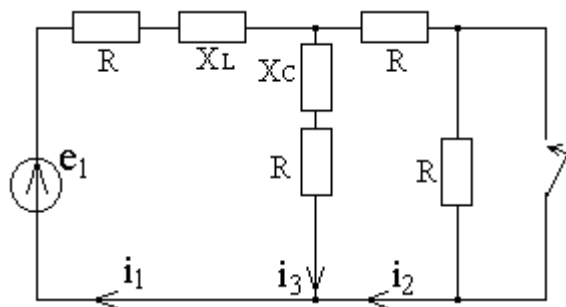
$$E_1 = 86.603 + 50i$$

$$F(E_1) = (100 \ 30)$$

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

$$E_2 = 69.282 + 40i$$

$$F(E_2) = (80 \ 30)$$



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

$$Z'_{vx} = 103.846 - 20.769i$$

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

$$\Gamma'_{1\text{дк}} = 0.709 + 0.623i$$

$$F(\Gamma'_{1\text{дк}}) = (0.944 \ 41.31)$$

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

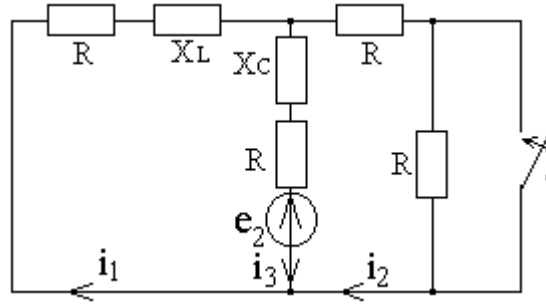
$$\Gamma'_{2\text{дк}} = 0.574 + 0.117i$$

$$F(\Gamma'_{2\text{дк}}) = (0.586 \ 11.565)$$

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

$$\Gamma'_{3\text{дк}} = 0.136 + 0.506i$$

$$F(\Gamma'_{3\text{дк}}) = (0.524 \ 75)$$



$$Z''_{vx} := R - X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \quad Z''_{vx} = 83.628 - 95.575i$$

$$I''_{3DK} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \quad I''_{3DK} = 0.122 + 0.618i \quad F(I''_{3DK}) = (0.63 \quad 78.814)$$

$$I''_{1DK} := I''_{3DK} \cdot \frac{(2 \cdot R)}{R + i \cdot X_L + 2 \cdot R} \quad I''_{1DK} = 0.108 + 0.405i \quad F(I''_{1DK}) = (0.419 \quad 75)$$

$$I''_{2DK} := I''_{3DK} - I''_{1DK} \quad I''_{2DK} = 0.014 + 0.213i \quad F(I''_{2DK}) = (0.214 \quad 86.31)$$

$$I_{1DK} := I'_{1DK} + I''_{1DK} \quad I_{1DK} = 0.818 + 1.028i \quad F(I_{1DK}) = (3.047 \quad 72.879)$$

$$I_{2DK} := I'_{2DK} + I''_{2DK} \quad I_{2DK} = 0.587 + 0.331i \quad F(I_{2DK}) = (0.674 \quad 29.37)$$

$$I_{3DK} := I'_{3DK} - I''_{3DK} \quad I_{3DK} = 0.013 - 0.112i \quad F(I_{3DK}) = (0.113 \quad -83.199)$$

$$u_{CDK} := I_{3DK} \cdot (-i \cdot X_C) \quad u_{CDK} = -11.203 - 1.336i \quad F(u_{CDK}) = (11.283 \quad -173.199)$$

$$u_{LDK} := I_{1DK} \cdot i \cdot X_L \quad u_{LDK} = -10.281 + 8.177i \quad F(u_{LDK}) = (13.136 \quad 141.501)$$

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

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

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

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

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

i

Початкові умови:

$$u_{CDK}(0) = -1.89$$

$$i_{LDK}(0) = 1.454$$

Given

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

$$e_1(0) - e_2(0) = u_{L0} + i_{10} \cdot R + u_{C0} + i_{30} \cdot R$$

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

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

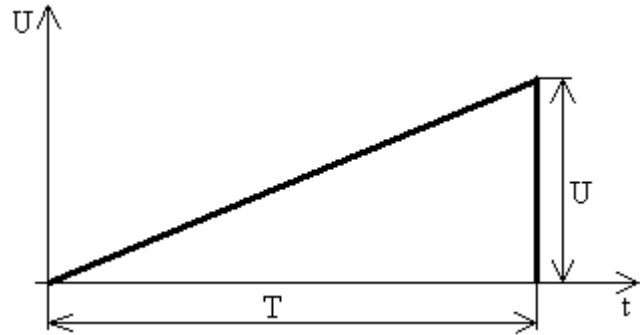
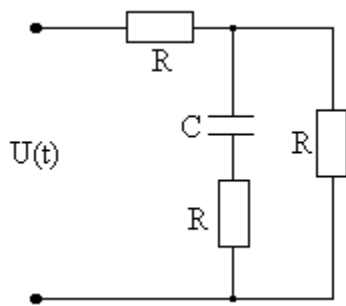
$$i_{10} = 1.454 \quad i_{20} = 1.274 \quad i_{30} = 0.18 \quad u_{L0} = -65.674 \quad u_{C0} = -1.89$$

# Інтеграл Дюамеля

$$T := 1.0$$

$$E_1 := 100$$

$$E := 1$$



Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{0}{R + R}$$

$$i_{1\text{дк}} = 0$$

$$i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}}$$

$$i_{3\text{дк}} = 0$$

$$i_{2\text{дк}} := 0$$

$$i_{2\text{дк}} = 0$$

$$u_{\text{Cдк}} := 0$$

$$u_{\text{Cдк}} = 0$$

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

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

$$E = i_{30} \cdot R + i_{10} \cdot R + u_{\text{C0}}$$

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

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

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

Вільний режим після комутації:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

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

$$p := R \cdot \left( 2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \left( \frac{1}{p \cdot C} + R \right) \Bigg|_{\text{solve}, p}^{\text{float}, 5} \rightarrow -133.33$$

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

$$T = 7.5 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -133.33$$

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:

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad i_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \quad i_2(t) \text{ float,5} \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot (1 - e^{pt}) \text{ float,5} \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-133.33 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

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

$$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 13333. \cdot t \quad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 13333. \quad U'_2 := 0$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 133. \cdot t + .333 - .333 \cdot \exp(-133. \cdot t)$$

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

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -.333 \cdot \exp(-133. \cdot t)$$

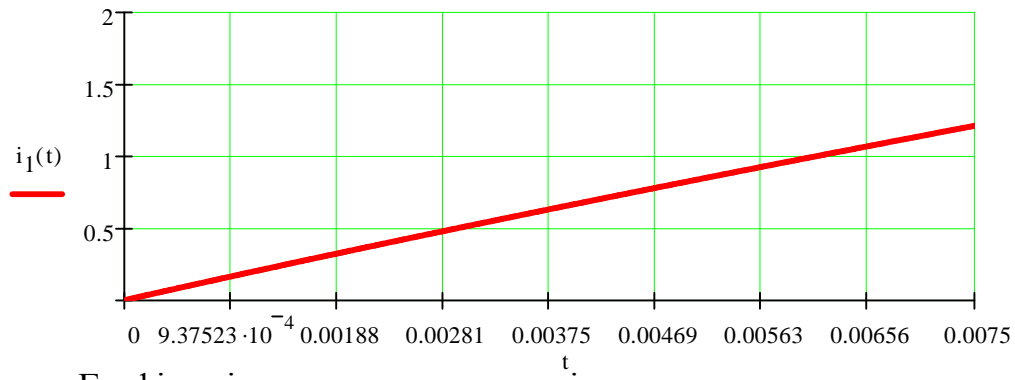
$$i_1(0.5) = 66.998 \quad i_2(1.5) = 0$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

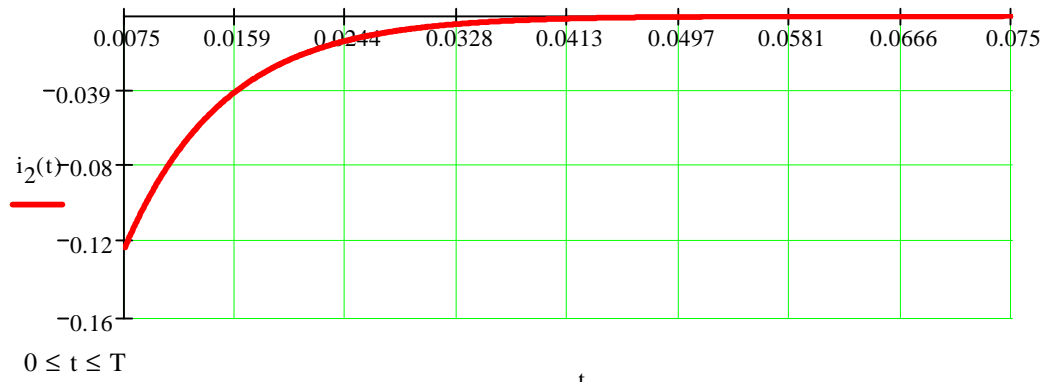
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,4} \rightarrow 6667. \cdot t - 50. + 50. \cdot \exp(-133.3 \cdot t)$$

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

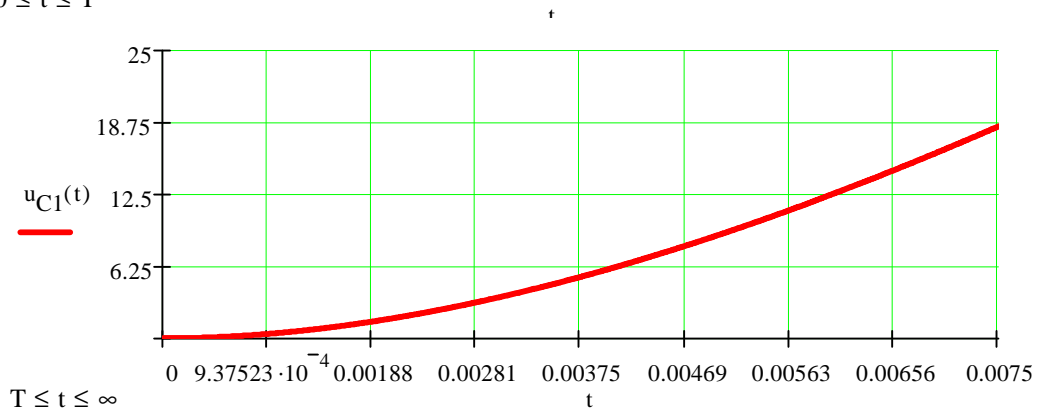
Графік вхідного струму на проміжку:  $0 \leq t \leq T$



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



$0 \leq t \leq T$



$T \leq t \leq \infty$

