

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

***Розрахунково-графічна робота***

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 911

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.

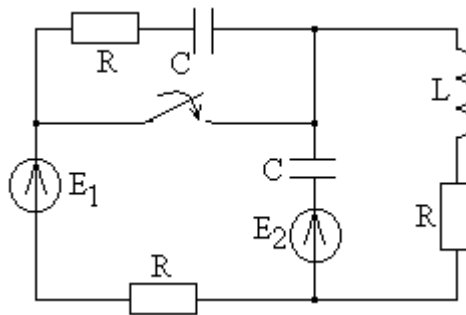
3. В післякомутаційній схемі замкнути джерело ЕДС  $E_2$ .

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.



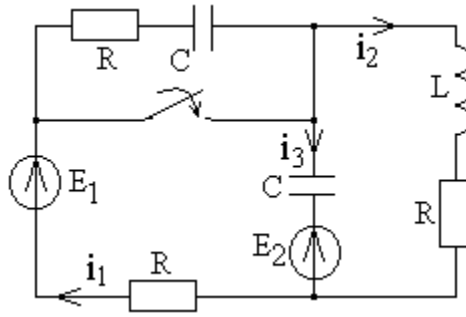
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.19$	Гн	$C := 250 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 70$	Ом		
$E_1 := 90$	В	$E_2 := 60$	В	$\psi := 45 \cdot \text{deg}$	$C^0$	$\omega := 200$	$c^{-1}$

## Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$\begin{aligned} i_{1\text{ДК}} &:= 0 & i_{2\text{ДК}} &:= i_{1\text{ДК}} & i_{2\text{ДК}} &= 0 \\ i_{3\text{ДК}} &:= 0 \end{aligned}$$

$$u_{\text{CDK}} := E_2 \qquad u_{\text{CDK}} = 60 \qquad u_{\text{LDK}} := 0$$

Усталений режим після комутації:  $t = \infty$

$$\begin{aligned} i'_1 &:= \frac{E_1}{2 \cdot R} & i'_2 &:= i'_1 & i'_2 &= 0.643 \\ i'_3 &:= 0 & u'_L &:= 0 \\ u'_C &:= E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R & u'_C &= -15 \end{aligned}$$

Незалежні початкові умови

$$\begin{aligned} i_{20} &:= i_{2\text{ДК}} & i_{20} &= 0 \\ u_{C0} &:= u_{\text{CDK}} & u_{C0} &= 60 \end{aligned}$$

Залежні початкові умови

Given

$$\begin{aligned} i_{20} &= i_{10} - i_{30} \\ E_1 - E_2 &= u_{C0} + i_{10} \cdot R \\ E_2 &= i_{20} \cdot R + u_{L0} - u_{C0} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.4285714 \\ -0.4285714 \\ 120. \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = -0.429 \quad i_{30} = -0.429 \quad u_{L0} = 120$$

Незалежні початкові умови

$$\begin{aligned} di_{20} &:= \frac{u_{L0}}{L} & di_{20} &= 631.579 \\ du_{C0} &:= \frac{i_{30}}{C} & du_{C0} &= -1.714 \times 10^3 \end{aligned}$$

Залежні початкові умови

Given

$$\begin{aligned} di_{10} &= di_{20} + di_{30} \\ 0 &= du_{C0} + di_{10} \cdot R \\ 0 &= di_{20} \cdot R + du_{L0} - du_{C0} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0}) \quad di_{10} = 24.49 \quad di_{30} = -607.089 \quad du_{L0} = -4.592 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \Big|_{\text{solve}, p} \rightarrow \begin{pmatrix} -269.09 \\ -156.47 \end{pmatrix}$$

Отже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -269.09 \quad p_2 = -156.47$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

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

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

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

Визначення сталих інтегрування:

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 1.271 \quad A_2 = -2.343$$

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

$$i''_1(t) := A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 5 \rightarrow 1.2711 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 2.3426 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .64286 + 1.2711 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 2.3426 \cdot \exp(-156.47 \cdot t) \quad i_1(0) = -0.429$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -4.715 \quad B_2 = 4.072$$

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

$$i''_2(t) := B_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + B_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 5 \rightarrow -4.7149 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) + 4.0720 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float}, 5 \rightarrow .64286 - 4.7149 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) + 4.0720 \cdot \exp(-156.47 \cdot t) \quad i_2(0) = -4 \times 10^{-5}$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 5.986 \quad C_2 = -6.415$$

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

$$i''_3(t) := C_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 5 \rightarrow 5.9860 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 6.4146 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 5.9860 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 6.4146 \cdot \exp(-156.47 \cdot t) \quad i_3(0) = -0.429$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -88.98 \quad D_2 = 163.98$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

$$u''_C(t) := D_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + D_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 6 \rightarrow -88.9803 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) + 163.980 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 5 \rightarrow -15. - 88.980 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) + 163.98 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

Given

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

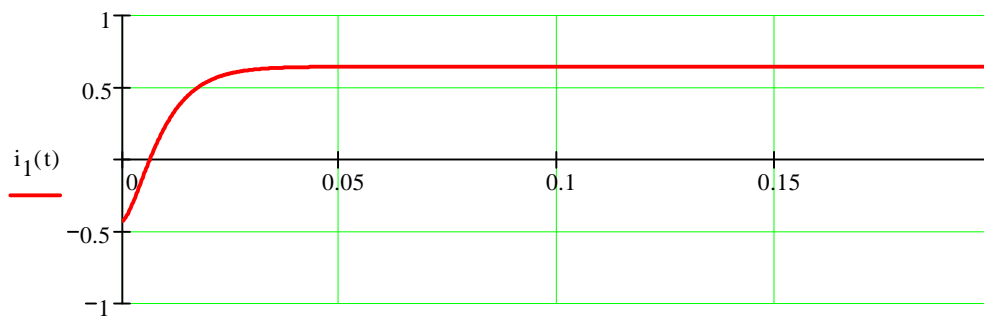
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = 241.062 \quad F_2 = -121.062$$

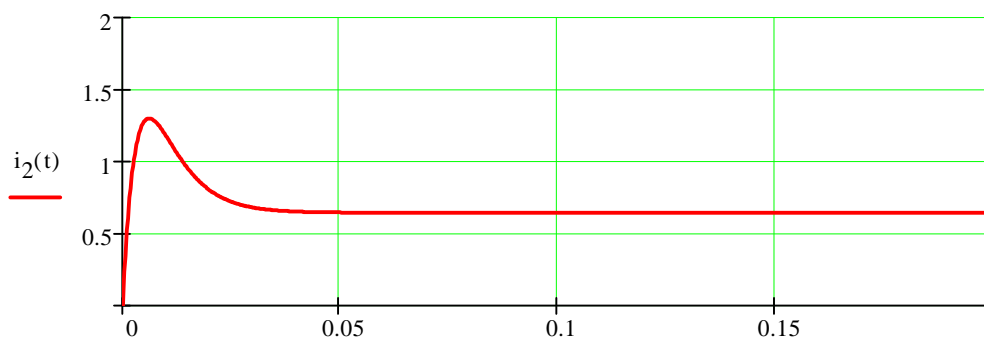
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

$$u''_L(t) := F_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + F_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 5 \rightarrow 241.06 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 121.06 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

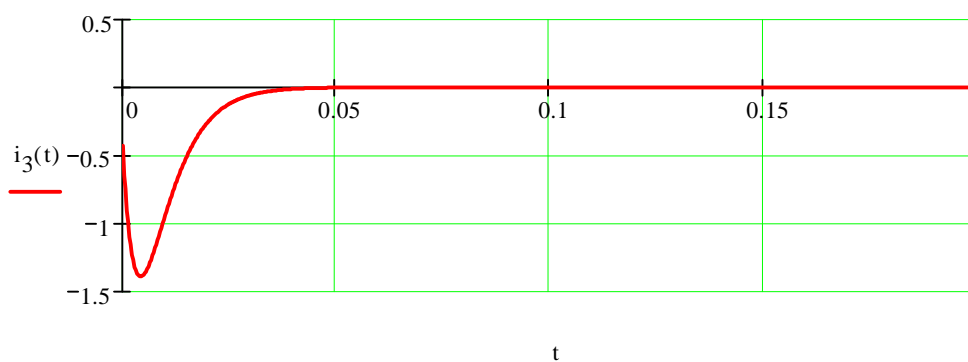
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 241.06 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 121.06 \cdot \exp(-156.47 \cdot t) \quad u_L(0) = 120$$



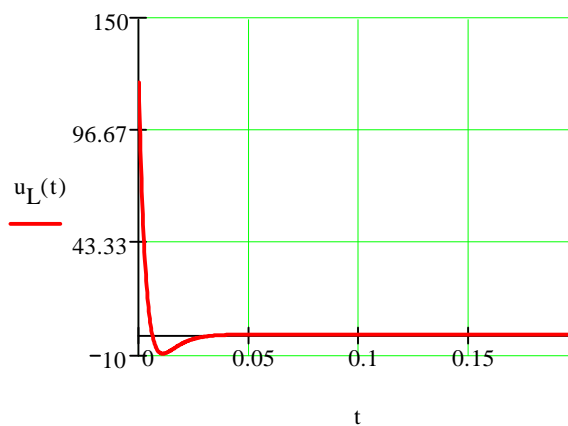
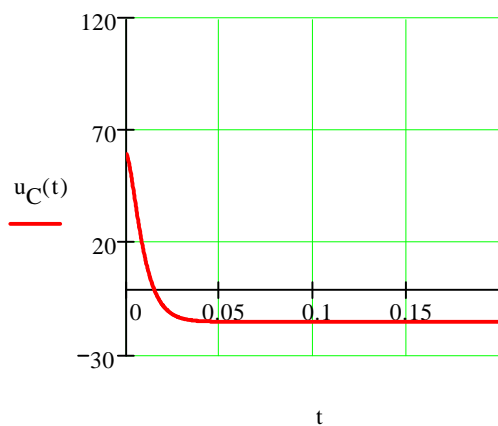
Графік перехідного струму  $i_1(t)$ .



Графік перехідного струму  $i_2(t)$ .

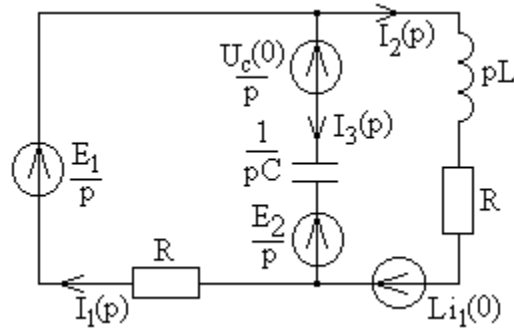


Графік перехідного струму  $i_3(t)$ .



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

## Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

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

$$i_{3\text{ДК}} := 0$$

$$u_{\text{CDK}} := \frac{E_2 - E_1}{2} \quad u_{\text{CDK}} = -15 \quad u_{\text{LDK}} := -u_{\text{CDK}} + E_2 \quad u_{\text{LDK}} = 75$$

Початкові умови:

$$i_{\text{L0}} := i_{2\text{ДК}} \quad i_{\text{L0}} = 0$$

$$u_{\text{C0}} = 60$$

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

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

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

$$\Delta(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (5660.0 \cdot p + 13.30 \cdot p^2 + 5.6000 \cdot 10^5)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{bmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C0}}}{p} & -\left( \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{\text{C0}}}{p} + L i_{20} & p \cdot L + R + \frac{1}{p \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_1(p) \text{ float,5} \rightarrow -1 \cdot \frac{(2100 \cdot p + 5.70 \cdot p^2 - 3.6000 \cdot 10^5)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{bmatrix} R + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p} - \frac{u_{\text{C0}}}{p} \\ -\left( \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{\text{C0}}}{p} + L i_{20} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_2(p) \text{ float,5} \rightarrow 1200 \cdot \frac{(7 \cdot p + 300.)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float,5} \rightarrow -1 \cdot \frac{(2100 \cdot p + 5.70 \cdot p^2 - 3.6000 \cdot 10^5)}{p^1 \cdot (5660.0 \cdot p + 13.30 \cdot p^2 + 5.6000 \cdot 10^5)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float,5} \rightarrow 1200 \cdot \frac{(7 \cdot p + 300)}{p^1 \cdot (5660.0 \cdot p + 13.30 \cdot p^2 + 5.6000 \cdot 10^5)^1}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float,5} \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -3 \cdot \frac{(35000 + 19 \cdot p)}{(5600000 + 56600 \cdot p + 133 \cdot p^2)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow 60 \cdot \frac{(-1400000 + 52800 \cdot p + 133 \cdot p^2)}{(5600000 + 56600 \cdot p + 133 \cdot p^2) \cdot p}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow 2280 \cdot \frac{(7 \cdot p + 300)}{(5600000 + 56600 \cdot p + 133 \cdot p^2)}$$

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

$$N_1(p) := -1 \cdot (2100 \cdot p + 5.70 \cdot p^2 - 3.6000 \cdot 10^5) \quad M_1(p) := p^1 \cdot (5660.0 \cdot p + 13.30 \cdot p^2 + 5.6000 \cdot 10^5)^1$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -269.09 \\ -156.47 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -269.09$$

$$p_2 = -156.47$$

$$N_1(p_0) = 3.6 \times 10^5$$

$$N_1(p_1) = 5.124 \times 10^5$$

$$N_1(p_2) = 5.49 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow 11320 \cdot p + 39.900 \cdot p^2 + 5.6000 \cdot 10^5$$

$$dM_1(p_0) = 5.6 \times 10^5$$

$$dM_1(p_1) = 4.03 \times 10^5$$

$$dM_1(p_2) = -2.344 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{float,5} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow .64286 + 1.2712 \cdot \exp(-269.09 \cdot t) - 2.3426 \cdot \exp(-156.47 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі  $U_C(p)$ :

$$N_u(p) := 60 \cdot (-1400000 + 52800 \cdot p + 133 \cdot p^2)$$

$$M_u(p) := p \cdot (5600000 + 56600 \cdot p + 133 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -156.47 \\ -269.09 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -156.47$$

$$p_2 = -269.09$$



$$N_u(p_0) = -8.4 \times 10^7 \quad N_u(p_1) = -3.843 \times 10^8$$

$$N_u(p_2) = -3.586 \times 10^8$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 5600000 + 113200 \cdot p + 399 \cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 5.6 \times 10^6 \quad dM_u(p_1) = -2.344 \times 10^6 \quad dM_u(p_2) = 4.03 \times 10^6$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 59.992$$

$$u_C(t) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -15. + 163.98 \cdot \exp(-156.47 \cdot t) - 88.987 \cdot \exp(-269.09 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 2280 \cdot (7 \cdot p + 300)$$

$$M_L(p) := (5600000 + 56600 \cdot p + 133 \cdot p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -156.47 \\ -269.09 \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -156.47$$

$$p_2 = -269.09$$

$$N_L(p_1) = -1.813 \times 10^6$$

$$N_L(p_2) = -3.611 \times 10^6$$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 56600 + 266 \cdot p$$

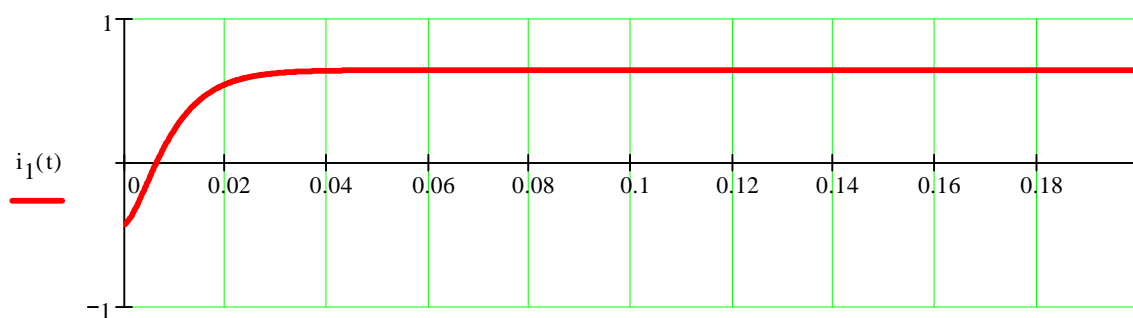
$$dM_L(p_1) = 1.498 \times 10^4$$

$$dM_L(p_2) = -1.498 \times 10^4$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 120.013$$

$$u_L(t) \left| \begin{array}{l} \text{float, 5} \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow -121.05 \cdot \exp(-156.47 \cdot t) + 241.07 \cdot \exp(-269.09 \cdot t)$$



І графік перехідного струму  $i_1(t)$ .

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

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

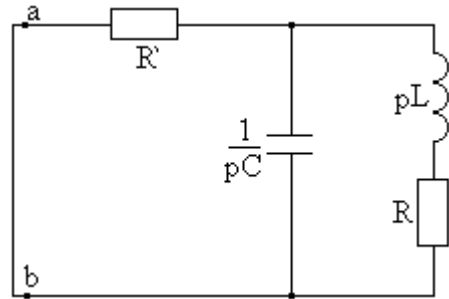
$$Z_{ab}(p) = \frac{R' \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L\right) + \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (R + p \cdot L)}{\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L}$$

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

$$D = 0$$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} 6.0734 \\ 51.131 \end{pmatrix}$$



**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:**

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

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

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

$$X_C = 20$$

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

$$X_L = 38$$

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

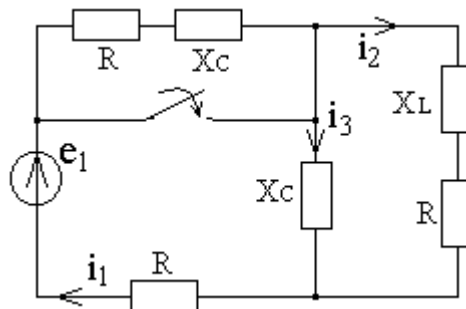
$$E_1 = 63.64 + 63.64i$$

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

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

$$E_2 = 42.426 + 42.426i$$

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



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

$$Z'_{vx} = 145.36 - 41.378i$$

$$I'_{1дк} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$$

$$I'_{1дк} = 0.29 + 0.52i$$

$$F(I'_{1дк}) = (0.595 \ 60.89)$$

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

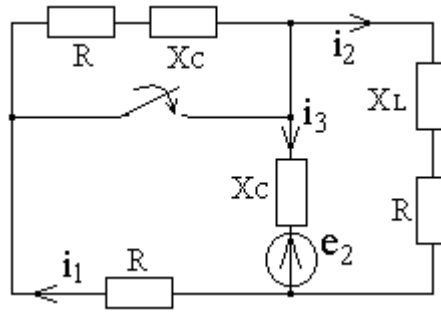
$$I'_{2дк} = 0.119 - 0.113i$$

$$F(I'_{2дк}) = (0.165 \ -43.531)$$

$$I'_{3дк} := I'_{1дк} - I'_{2дк}$$

$$I'_{3дк} = 0.17 + 0.634i$$

$$F(I'_{3дк}) = (0.656 \ 74.964)$$



$$Z''_{vx} := -X_C \cdot i + \frac{(R + i \cdot X_L) \cdot (2 \cdot R - i \cdot X_C)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C} \quad Z''_{vx} = 51.507 - 5.748i$$

$$I''_{3dk} := \frac{E_2}{Z''_{vx}} \quad I''_{3dk} = 0.723 + 0.904i \quad F(I''_{3dk}) = (1.158 \quad 51.368)$$

$$I''_{1dk} := I''_{3dk} \cdot \frac{(R + i \cdot X_L)}{R + i \cdot X_L + R + R - i \cdot X_C} \quad I''_{1dk} = 0.113 + 0.423i \quad F(I''_{1dk}) = (0.437 \quad 74.964)$$

$$I''_{2dk} := I''_{3dk} - I''_{1dk} \quad I''_{2dk} = 0.609 + 0.482i \quad F(I''_{2dk}) = (0.777 \quad 38.339)$$

$$I_{1dk} := I'_{1dk} + I''_{1dk} \quad I_{1dk} = 0.403 + 0.943i \quad F(I_{1dk}) = (1.025 \quad 66.845)$$

$$I_{2dk} := I'_{2dk} + I''_{2dk} \quad I_{2dk} = 0.729 + 0.368i \quad F(I_{2dk}) = (0.817 \quad 26.815)$$

$$I_{3dk} := I'_{3dk} - I''_{3dk} \quad I_{3dk} = -0.553 - 0.271i \quad F(I_{3dk}) = (0.615 \quad -153.908)$$

$$u_{Cdk} := I_{3dk} \cdot (-i \cdot X_C) \quad u_{Cdk} = -5.412 + 11.051i \quad F(u_{Cdk}) = (12.305 \quad 116.092)$$

$$u_{Ldk} := I_{1dk} \cdot i \cdot X_L \quad u_{Ldk} = -35.826 + 15.322i \quad F(u_{Ldk}) = (38.965 \quad 156.845)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = 15.628$$

$$i_{20} = 0.521$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 0.205$$

$$i_{20} = 0.521$$

$$i_{30} = -0.316$$

$$u_{L0} = 39.163$$

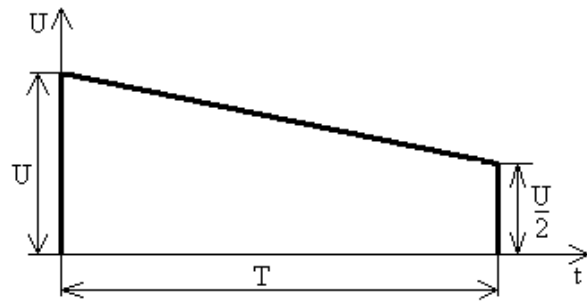
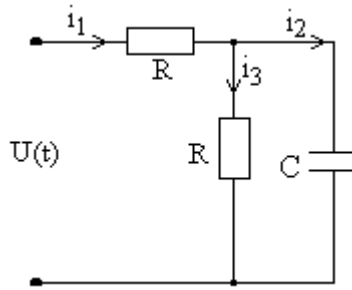
$$u_{C0} = 15.628$$

# Інтеграл Дюамеля

$$T := 0.9$$

$$E_1 := 90$$

$$E := 1$$



Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{0}{R + R}$$

$$i_{1\text{дк}} = 0$$

$$i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}}$$

$$i_{3\text{дк}} = 0$$

$$i_{2\text{дк}} := 0$$

$$i_{2\text{дк}} = 0$$

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

$$u_{C\text{дк}} = 0$$

Усталений режим після комутації:  $t = \infty$

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

$$i'_1 = 7.143 \times 10^{-3}$$

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

$$i'_3 = 7.143 \times 10^{-3}$$

$$i'_2 := 0$$

$$i'_2 = 0$$

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

$$u'_C = 0.5$$

Незалежні початкові умови

$$u_{C0} := u_{C\text{дк}}$$

$$u_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 0.014$$

$$i_{20} = 0.014$$

$$i_{30} = 0$$

Вільний режим після комутації:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

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

$$p := R \cdot \left( R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \frac{1}{p \cdot C} \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow -114.29$$

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

$$T = 7.875 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -114.29$$

Вільна складова струма буде мати вигляд:

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

Визначення сталих інтегрування:

$$A_1 := i_{10} - i'_1 \quad A_1 = 7.143 \times 10^{-3}$$

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

Повні значення цих струмів:

$$g_{11}(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 7.1429 \cdot 10^{-3} + 7.1429 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-114.29 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := A_1 \cdot R - A_1 \cdot R \cdot e^{p \cdot t} \text{ float,5} \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-114.29 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

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

$$U_1(t) := U_0 - \frac{E_1}{2T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 90. - 5714.5 \cdot t \quad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow -5714.5$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,2} \end{array} \right. \rightarrow .29 + \exp(-1.1 \cdot 10^2 \cdot t) - 41 \cdot t$$

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

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow \exp(-114 \cdot t) - .679 \cdot \exp(-114 \cdot t + .900)$$

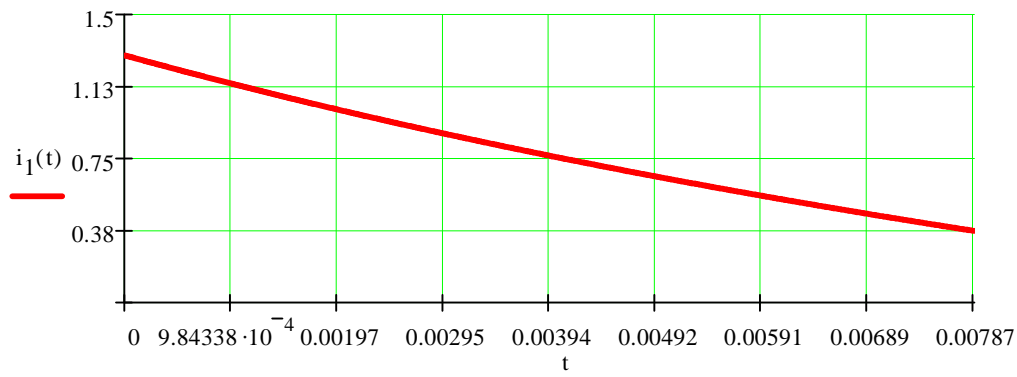
Напруга на ємності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,5} \rightarrow 70.000 - 70.000 \cdot \exp(-114.29 \cdot t) - 2857.3 \cdot t$$

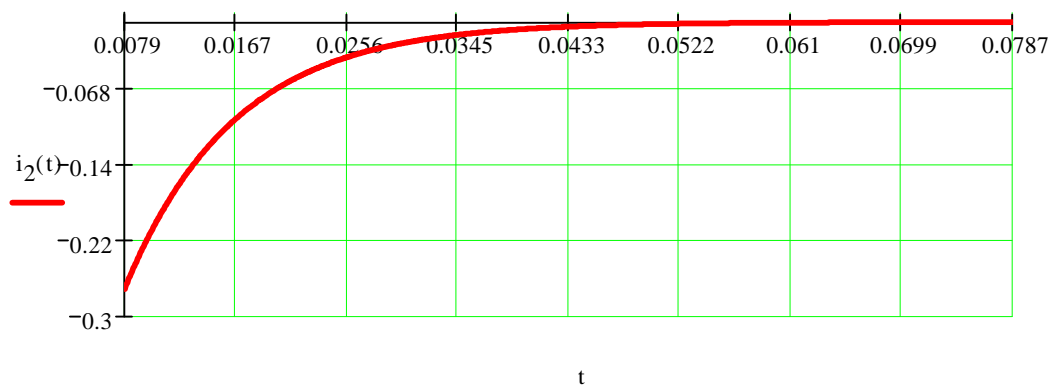
$$u_{C2}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^T U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau + \left( U_2 - \frac{E_1}{2} \right) \cdot h_{cU}(t - T)$$

$$u_{C2}(t) \text{ float,3} \rightarrow -70.0 \cdot \exp(-114 \cdot t) + 47.5 \cdot \exp(-114 \cdot t + .900)$$

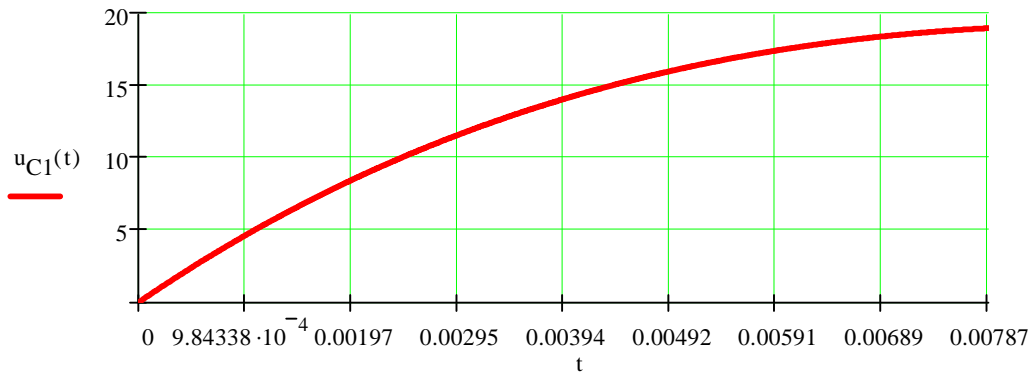
Графік вхідного струму на проміжку:  $0 \leq t \leq T$



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



Графік наруги на реактивному елементі на проміжку:  $0 \leq t \leq T$



Графік наруги на реактивному елементі на проміжку:  $T \leq t \leq \infty$

