

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

***Розрахунково-графічна робота***

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”  
Варіант № 418

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.

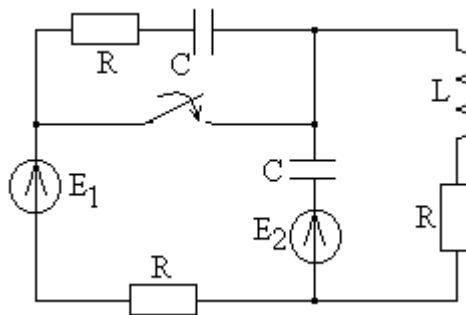
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС  $E_2$ .

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  $\tau$ ;

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



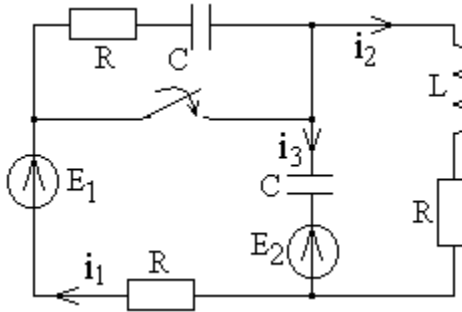
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.15$	Гн	$C := 700 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 50$	Ом		
$E_1 := 90$	В	$E_2 := 60$	В	$\psi := 45 \cdot \text{deg}$	$C^0$	$\omega := 200$	$\text{с}^{-1}$

## Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

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

$$u_{C\text{дк}} := E_2 \quad u_{C\text{дк}} = 60 \quad u_{L\text{дк}} := 0$$

Усталений режим після комутації:  $t = \infty$

$$\begin{aligned} i'_1 &:= \frac{E_1}{2 \cdot R} & i'_2 &:= i'_1 & i'_2 &= 0.9 \\ i'_3 &:= 0 & u'_L &:= 0 \\ u'_C &:= E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R & u'_C &= -15 \end{aligned}$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float, 7} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.6000000 \\ -0.6000000 \\ 120. \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = -0.6 \quad i_{30} = -0.6 \quad u_{L0} = 120$$

Незалежні початкові умови

$$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{20} = 800$$

$$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = -857.143$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0}) \quad di_{10} = 17.143 \quad di_{30} = -782.857 \quad du_{L0} = -4.086 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := \frac{1}{p \cdot C} \cdot (R + p \cdot L) + R \cdot \left( R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -297.98 \\ -63.922 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -297.98 \quad p_2 = -63.922$$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 0.336 \quad A_2 = -1.836$$

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

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float, } 7 \rightarrow .9000000 + .3364130 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 1.836413 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_1(0) = -0.6$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -3.172 \quad B_2 = 2.272$$

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

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

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float, } 7 \rightarrow .9000000 - 3.172163 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.272163 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_2(0) = 0$$

Given

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

$$di_{20} - 0 = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2$$

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = -3.254 \quad C_2 = 2.654$$

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

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

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -3.254094 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.654094 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_3(0) = -0.6$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -16.821 \quad D_2 = 91.821$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -15. - 16.82065 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 91.82065 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad u_C(0) = 60$$

Given

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

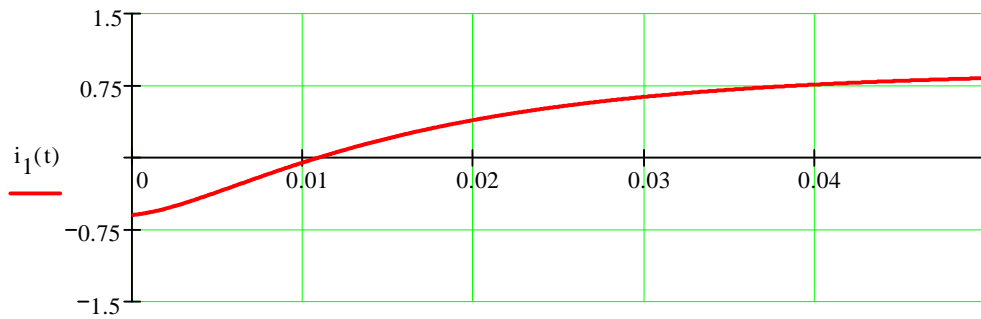
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = 141.788 \quad F_2 = -21.788$$

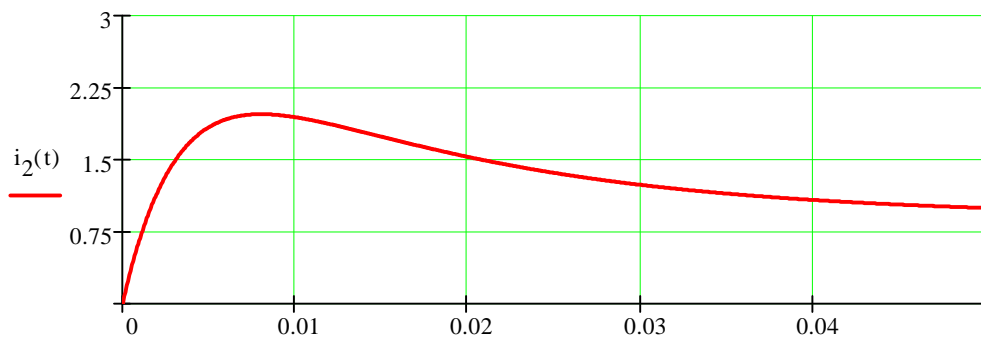
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

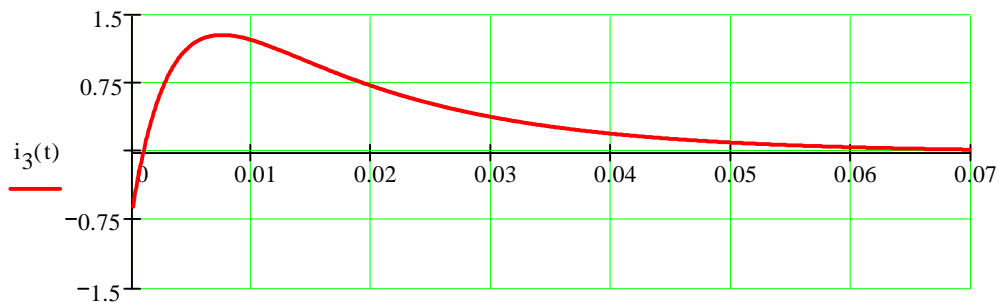
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 141.7875 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 21.78752 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad u_L(0) = 120$$



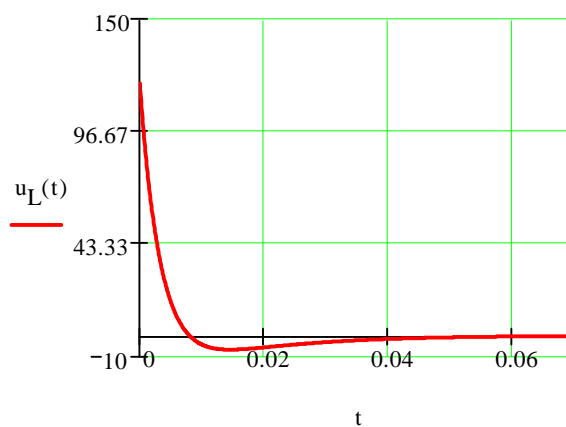
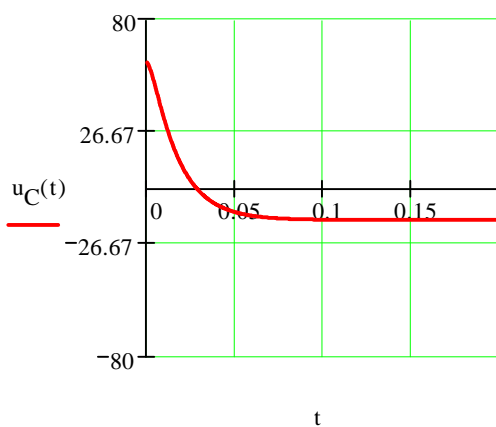
Графік перехідного струму  $i_1(t)$ .



Графік перехідного струму  $i_2(t)$ .

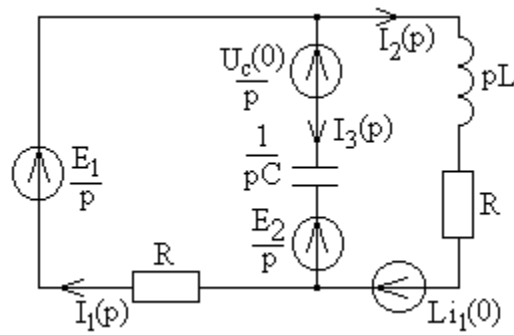


Графік перехідного струму  $i_3(t)$ .



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

## Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації:  $t < 0$

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

$$i_{3\text{дк}} := 0$$

$$u_{\text{Cдк}} := E_2 \quad u_{\text{Cдк}} = 60 \quad u_{\text{Lдк}} := -u_{\text{Cдк}} + E_2 \quad u_{\text{Lдк}} = 0$$

Початкові умови:

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

$$u_{\text{C}0} = 60$$

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

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

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

$$\Delta(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (2714.3 \cdot p + 7.5000 \cdot p^2 + 1.4286 \cdot 10^5)$$

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

$$\Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow -1 \cdot \frac{(1500 \cdot p + 4.50 \cdot p^2 - 1.2857 \cdot 10^5)}{p^2}$$

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

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow 857.14 \cdot \frac{(7 \cdot p + 150.)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow -1 \cdot \frac{(1500 \cdot p + 4.50 \cdot p^2 - 1.2857 \cdot 10^5)}{p^1 \cdot (2714.3 \cdot p + 7.5000 \cdot p^2 + 1.4286 \cdot 10^5)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow 857.14 \cdot \frac{(7 \cdot p + 150)}{p^1 \cdot (2714.3 \cdot p + 7.5000 \cdot p^2 + 1.4286 \cdot 10^5)^1}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -2.00000000000000000000 \cdot \frac{(374999 \cdot p + 225 \cdot p^2 + 50)}{p \cdot (27143 \cdot p + 75 \cdot p^2 + 1428600)}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{128571}{100} \cdot \frac{(7 \cdot p + 150)}{(27143 \cdot p + 75 \cdot p^2 + 1428600)}$$

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

$$N_1(p) := -1 \cdot (1500 \cdot p + 4.50 \cdot p^2 - 1.2857 \cdot 10^5) \quad M_1(p) := p^1 \cdot (2714.3 \cdot p + 7.5000 \cdot p^2 + 1.4286 \cdot 10^5)^1$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -297.98 \\ -63.923 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -297.98$$

$$p_2 = -63.923$$

$$N_1(p_0) = 1.286 \times 10^5$$

$$N_1(p_1) = 1.76 \times 10^5$$

$$N_1(p_2) = 2.061 \times 10^5$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 5428.6 \cdot p + 22.500 \cdot p^2 + 1.4286 \cdot 10^5$$

$$dM_1(p_0) = 1.429 \times 10^5 \quad dM_1(p_1) = 5.231 \times 10^5$$

$$dM_1(p_2) = -1.122 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 3 \rightarrow .900 + .336 \cdot \exp(-298 \cdot t) - 1.84 \cdot \exp(-63.9 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := \frac{128571}{100} \cdot (7 \cdot p + 150)$$

$$M_L(p) := (27143 \cdot p + 75 \cdot p^2 + 1428600)$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -63.92 \\ -297.98 \end{pmatrix}$$

$$p_1 = -63.92$$

$$p_2 = -297.98$$

$$N_L(p_1) = -3.824 \times 10^5$$

$$N_L(p_2) = -2.489 \times 10^6$$

$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 27143 + 150 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 1.756 \times 10^4$$

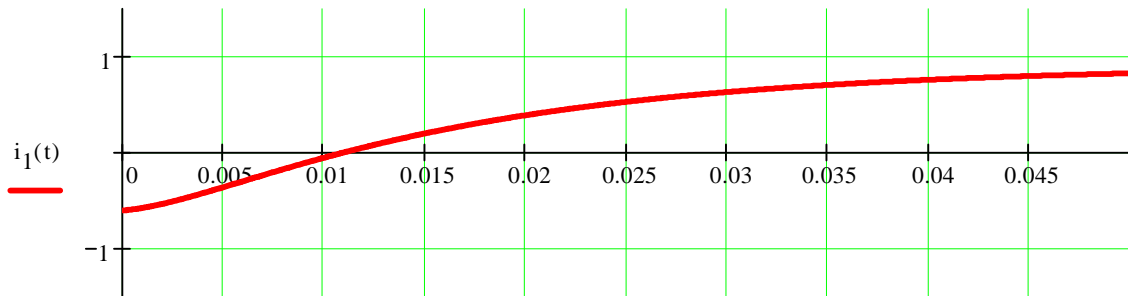
$$dM_L(p_2) = -1.755 \times 10^4$$



Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 120.004$$

$$u_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow -21.784 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) + 141.79 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$



Графік перехідного струму  $i_1(t)$ .

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

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

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

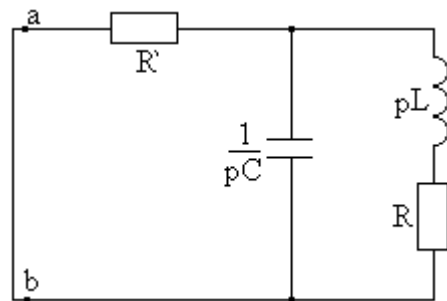
$$(R' \cdot L) \cdot p^2 + \left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right) \cdot p + \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) = 0$$

$$D = 0$$

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

$$\left(R \cdot R' + \frac{L}{C}\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{float}, 5}^{\text{solve}, R'} \rightarrow \begin{pmatrix} 2.7030 \\ 10.340 \end{pmatrix}$$

$$R'_1 := 2.7030 \quad R'_2 := 10.340$$



**Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації ( $t=0$ ), якщо замість джерел постійної напруги  $E_1$  і  $E_2$  у колі діють джерела синусоїдної напруги:**

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

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

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

$$X_C = 7.143$$

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

$$X_L = 30$$

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

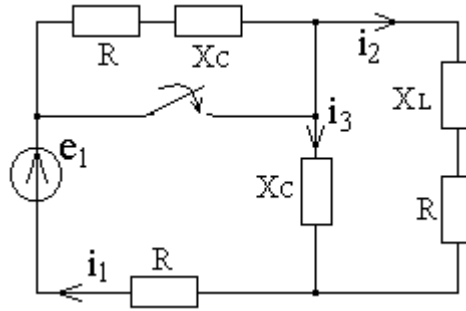
$$E_1 = 63.64 + 63.64i$$

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

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

$$E_2 = 42.426 + 42.426i$$

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



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

$$Z'_{vx} = 100.844 - 14.672i$$

$$I'_{1dk} := \frac{E_1}{Z'_{vx}}$$

$$I'_{1dk} = 0.528 + 0.708i$$

$$F(I'_{1dk}) = (0.883 \quad 53.278)$$

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

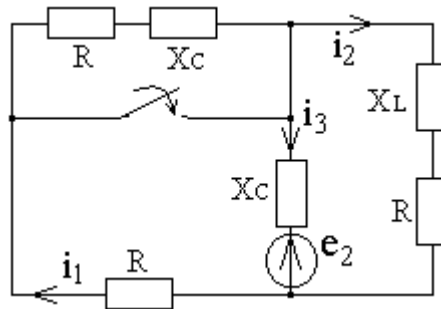
$$I'_{2dk} = 0.055 - 0.101i$$

$$F(I'_{2dk}) = (0.115 \quad -61.289)$$

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

$$I'_{3dk} = 0.473 + 0.809i$$

$$F(I'_{3dk}) = (0.937 \quad 59.674)$$



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

$$Z''_{vx} = 36.597 + 4.9i$$

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

$$I''_{3dk} = 1.291 + 0.986i$$

$$F(I''_{3dk}) = (1.625 \quad 37.375)$$

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

$$I''_{1dk} = 0.315 + 0.539i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.624 \quad 59.674)$$

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

$$I''_{2dk} = 0.976 + 0.447i$$

$$F(I''_{2dk}) = (1.074 \quad 24.625)$$

$I_{1\text{дк}} := \Gamma_{1\text{дк}} + \Gamma''_{1\text{дк}}$	$I_{1\text{дк}} = 0.843 + 1.247i$	$F(I_{1\text{дк}}) = (1.505 \quad 55.927)$
$I_{2\text{дк}} := \Gamma_{2\text{дк}} + \Gamma''_{2\text{дк}}$	$I_{2\text{дк}} = 1.031 + 0.347i$	$F(I_{2\text{дк}}) = (1.088 \quad 18.586)$
$I_{3\text{дк}} := \Gamma_{3\text{дк}} - \Gamma''_{3\text{дк}}$	$I_{3\text{дк}} = -0.818 - 0.178i$	$F(I_{3\text{дк}}) = (0.837 \quad -167.738)$
$u_{\text{Cдк}} := I_{3\text{дк}} \cdot (-i \cdot X_{\text{C}})$	$u_{\text{Cдк}} = -1.27 + 5.846i$	$F(u_{\text{Cдк}}) = (5.982 \quad 102.262)$
$u_{\text{Lдк}} := I_{1\text{дк}} \cdot i \cdot X_{\text{L}}$	$u_{\text{Lдк}} = -37.408 + 25.302i$	$F(u_{\text{Lдк}}) = (45.161 \quad 145.927)$
$i_{1\text{дк}}(t) :=  I_{1\text{дк}}  \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{1\text{дк}}))$		
$i_{2\text{дк}}(t) :=  I_{2\text{дк}}  \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{2\text{дк}}))$		
$i_{3\text{дк}}(t) :=  I_{3\text{дк}}  \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{3\text{дк}}))$		
$u_{\text{Cдк}}(t) :=  u_{\text{Cдк}}  \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(u_{\text{Cдк}}))$		
$u_{\text{Lдк}}(t) :=  u_{\text{Lдк}}  \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(u_{\text{Lдк}}))$		

Початкові умови:

$$u_{\text{Cдк}}(0) = 8.267$$

$$i_{20} = 0.49$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = 0.435$$

$$i_{20} = 0.49$$

$$i_{30} = -0.056$$

$$u_{\text{L0}} = 43.749$$

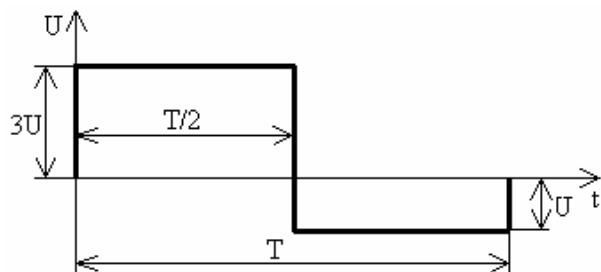
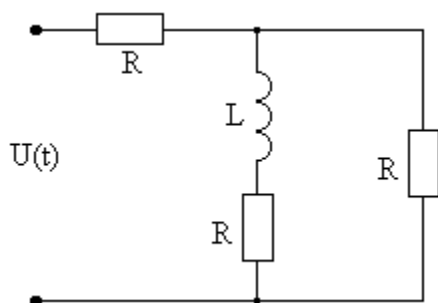
$$u_{\text{C0}} = 8.267$$

## Інтеграл Дюамеля

$$T := 0.9$$

$$E_1 := 90$$

$$E := 1$$



Усталений режим до комутації:  $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{0}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \quad i_{1\text{дк}} = 0$$

$$i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \cdot \frac{R}{R + R} \quad i_{3\text{дк}} = 0 \quad i_{2\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \cdot \frac{R}{R + R} \quad i_{2\text{дк}} = 0$$

$$u_{L\text{дк}} := 0$$

Усталений режим після комутації:  $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E}{\left(\frac{R \cdot R}{R + R}\right) + R} \quad i'_1 = 0.013$$

$$i'_3 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \quad i'_3 = 6.667 \times 10^{-3} \quad i'_2 := i'_1 \cdot \frac{R}{R + R} \quad i'_2 = 6.667 \times 10^{-3}$$

$$u'_L := 0$$

Незалежні початкові умови

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

Залежні початкові умови

Given

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

$$E = i_{20} \cdot R + i_{10} \cdot R$$

$$0 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \quad i_{10} = 0.01 \quad i_{20} = 0.01 \quad i_{30} = 0 \quad u_{L0} = 0.5$$

Вільний режим після комутації:  $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

$$Z_{vx}(p) := R + \frac{R \cdot (p \cdot L + R)}{p \cdot L + R + R} \quad Z_{vx}(p) := \frac{R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R)}{p \cdot L + R + R}$$

$$p := R \cdot (p \cdot L + R + R) + R \cdot (p \cdot L + R) \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } p \\ \text{float, } 5 \end{array} \right. \rightarrow -500. \quad T := \frac{1}{|p|} \cdot T \quad T = 1.8 \times 10^{-3}$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -500$$

Вільні складові повних струмів та напруг будуть мати вигляд:

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

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

Визначення сталих інтегрування:

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

$$B_1 := i_{30} - i'_3 \quad B_1 = -6.667 \times 10^{-3}$$

Отже вільна складова струму  $i_1(t)$  та  $i_3(t)$  будуть мати вигляд:

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

$$i''_3(t) := B_1 \cdot e^{p \cdot t}$$

Повні значення цих струмів:

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad i_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \quad i_3(t) \text{ float,5} \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} - 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.3333 \cdot 10^{-2} - 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

$$U_L(t) := L \frac{d}{dt} i_3(t)$$

$$h_{uL}(t) := U_L(t) \text{ float,5} \rightarrow .50000 \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

$$U_0 := 3E_1 \quad U_0 = 270$$

$$U_1 := 3E_1 \quad U_1 = 270 \quad 0 < t < \frac{T}{2}$$

$$U_2 := -E_1 \quad U_2 = -90 \quad \frac{T}{2} < t < T$$

$$U_3 := 0 \quad T < t < \infty$$

$$U'_1 := 0 \quad U'_2 := 0$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t)$$

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 3.60 - .900 \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow -1.2000 - .90000 \cdot \exp(-500 \cdot t) + 1.2000 \cdot \exp(-500 \cdot t + .45000)$$

$$i_3(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot g_{11}(t - T)$$

$$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -.900 \cdot \exp(-500 \cdot t) + 1.20 \cdot \exp(-500 \cdot t + .450) - .300 \cdot \exp(-500 \cdot t + .900)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float, 5} \rightarrow 135.00 \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

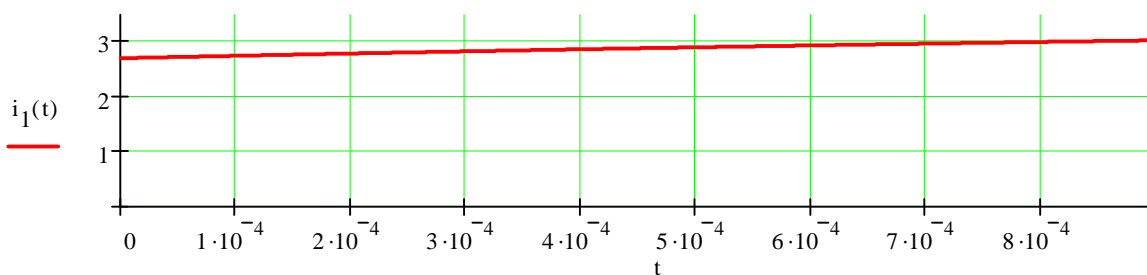
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float, 5} \rightarrow 135.00 \cdot \exp(-500 \cdot t) - 180.00 \cdot \exp(-500 \cdot t + .45000)$$

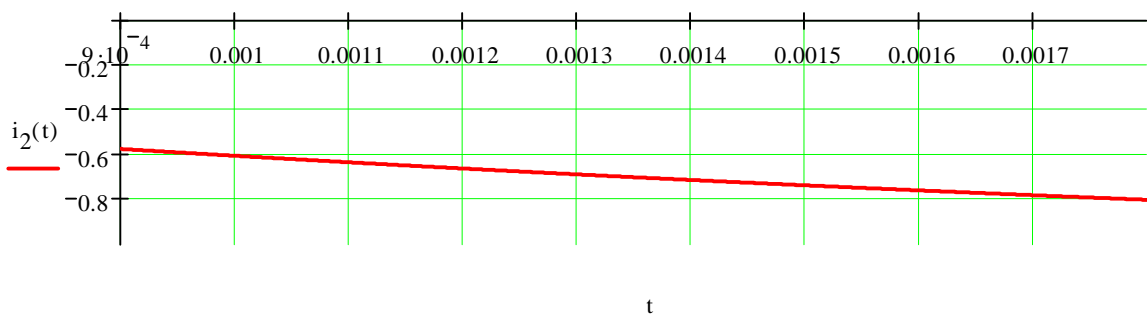
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{T}{2}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float, 5} \rightarrow 135.00 \cdot \exp(-500 \cdot t) - 180.00 \cdot \exp(-500 \cdot t + .45000) + 45.000 \cdot \exp(-500 \cdot t + .90000)$$

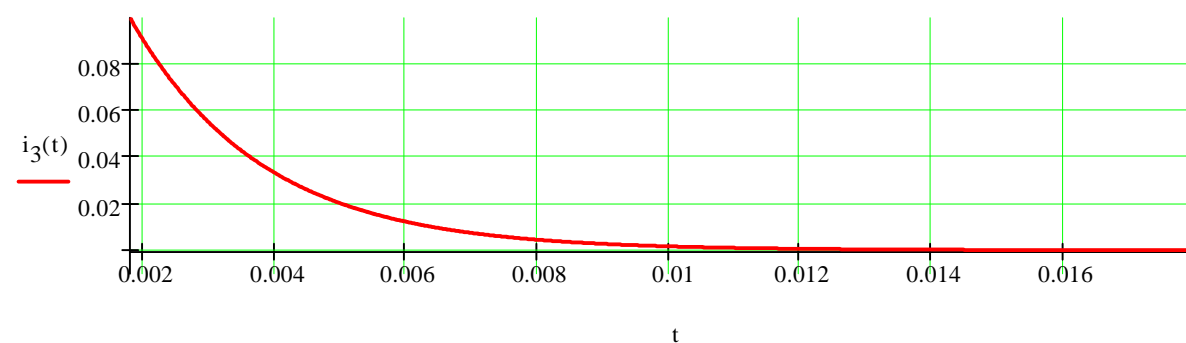
На проміжку від 0 до  $1/2T$



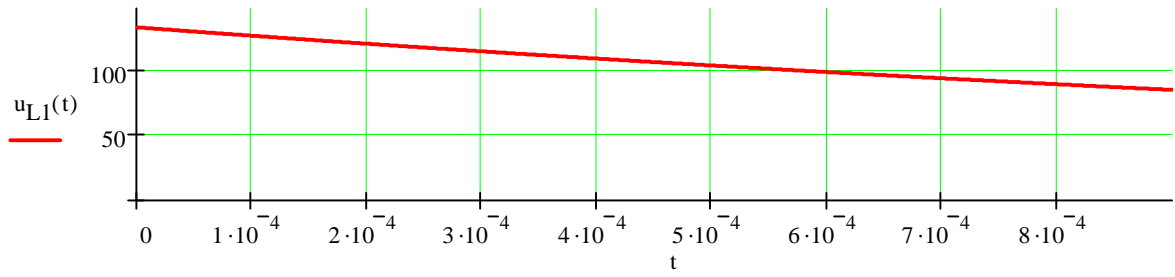
На проміжку від  $1/2T$  до  $T$



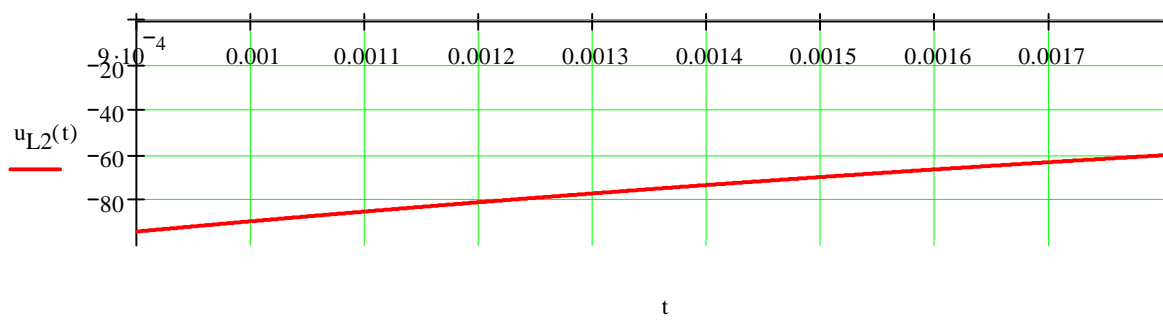
На проміжку від  $T$  до  $10T$



На промежутке от 0 до  $1/2T$



На промежутке от  $1/2T$  до  $T$



На промежутке от  $T$  до  $10T$

