

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”
Варіант № 458

Виконав: _____

Перевірив: _____

Умова завдання

1. В колі з джерелом постійної ЕДС необхідно:

- 1) класичним методом розрахувати напруги на реактивних елементах та струми перехідного процесу;
- 2) розрахувати струм в колі з джерелом ЕДС E_1 та напругу на реактивному елементі операторним методом;
- 3) побудувати в одному часовому масштабі діаграми струму та напруги на реактивних елементах.

2. Дослідити, яким повинен бути активний опір у вітці з джерелом E_1 , щоб перехідний процес проходив в граничному режимі.

3. Визначити струми в вітках та напруги на реактивних елементах в момент комутації ($t=0$), якщо замість джерел постійних ЕДС E_1 і E_2 в колі діють синусоїдні джерела.

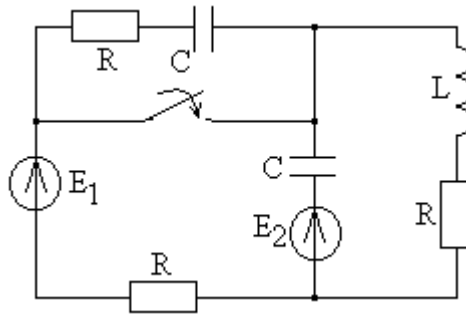
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

а) виключити катушку індуктивності чи ємність, замінивши останню опором R ;

б) вважаючи, що замість джерела постійної ЕДС E_1 до отриманного кола подається напруга, форма якої показана на малюнку;

в) розрахувати вхідний струм та напругу на реактивному елементі методом інтеграла Дюамеля при періоді T , заданому в долях від τ ;

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



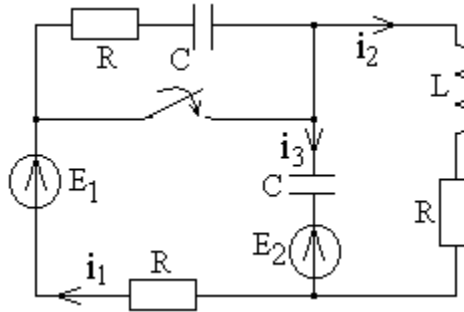
Основна схема

Вхідні данні:

$L := 0.15$	Гн	$C := 700 \cdot 10^{-6}$	Ф	$R := 50$	Ом		
$E_1 := 70$	В	$E_2 := 50$	В	$\psi := 210 \cdot \text{deg}$	C^0	$\omega := 100$	c^{-1}

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$$u_{C\text{дк}} := E_2 \quad u_{C\text{дк}} = 50 \quad u_{L\text{дк}} := 0$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$\begin{aligned} i'_1 &:= \frac{E_1}{2 \cdot R} & i'_2 &:= i'_1 & i'_2 &= 0.7 \\ i'_3 &:= 0 & u'_L &:= 0 \\ u'_C &:= E_1 - E_2 - i'_1 \cdot R & u'_C &= -15 \end{aligned}$$

Незалежні початкові умови

$$\begin{aligned} i_{20} &:= i_{2\text{дк}} & i_{20} &= 0 \\ u_{C0} &:= u_{C\text{дк}} & u_{C0} &= 50 \end{aligned}$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{30} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{30}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.6000000 \\ -0.6000000 \\ 100. \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = -0.6 \quad i_{30} = -0.6 \quad u_{L0} = 100$$

Незалежні початкові умови

$$di_{20} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{20} = 666.667$$

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

Залежні початкові умови

Given

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

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

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

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{30} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{30}, du_{L0}) \quad di_{10} = 17.143 \quad di_{30} = -649.524 \quad du_{L0} = -3.419 \times 10^4$$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 0.282 \quad A_2 = -1.582$$

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

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float, } 7 \rightarrow .7000000 + .2817923 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 1.581792 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_1(0) = -0.6$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -2.657 \quad B_2 = 1.957$$

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

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

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \text{ float, } 7 \rightarrow .7000000 - 2.657125 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 1.957125 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_2(0) = 0$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = -2.684 \quad C_2 = 2.084$$

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

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

$$i_3(t) := i'_3 + i''_3(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -2.684435 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 2.084435 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad i_3(0) = -0.6$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -14.09 \quad D_2 = 79.09$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u'_C + u''_C(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -15. - 14.08962 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) + 79.08962 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad u_C(0) = 50$$

Given

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

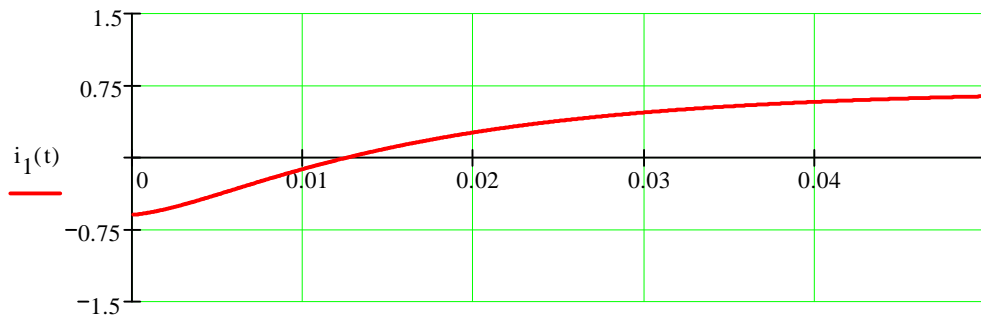
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = 118.767 \quad F_2 = -18.767$$

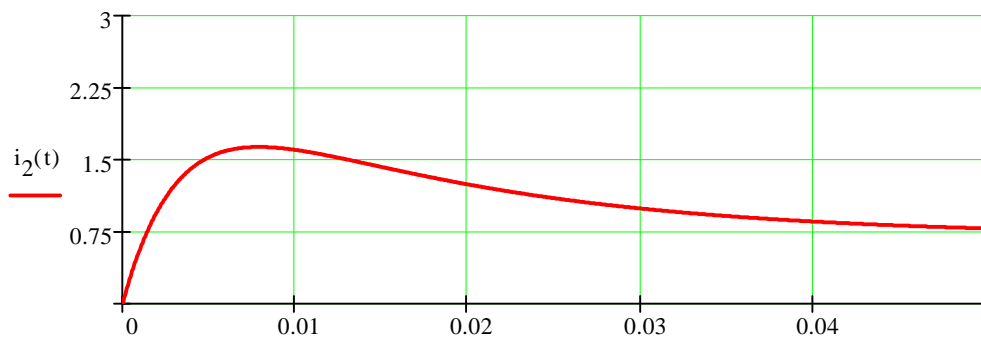
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

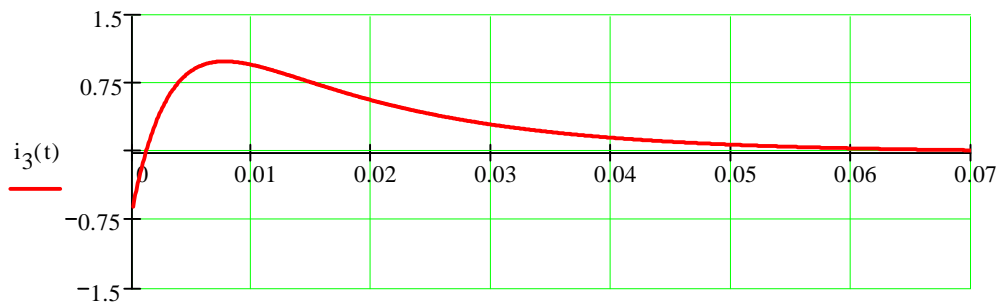
$$u_L(t) := u'_L + u''_L(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 118.7666 \cdot \exp(-297.98 \cdot t) - 18.76661 \cdot \exp(-63.922 \cdot t) \quad u_L(0) = 100$$



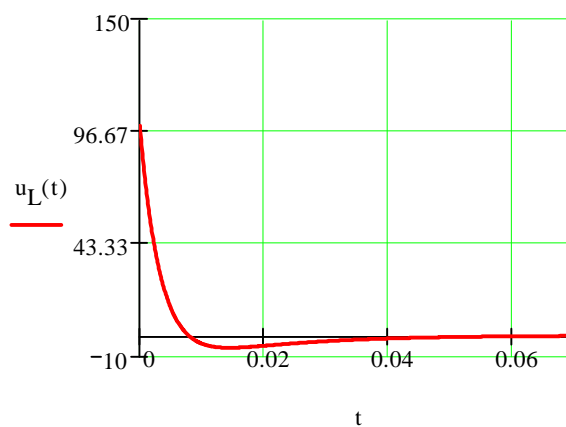
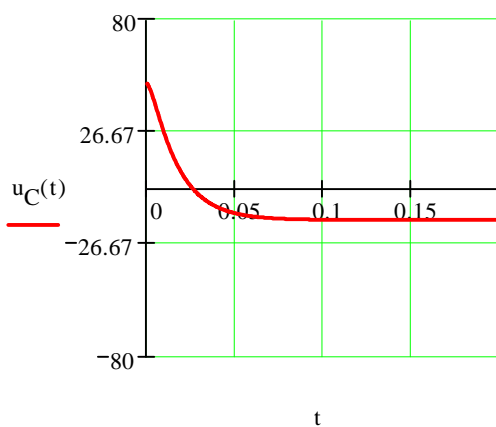
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

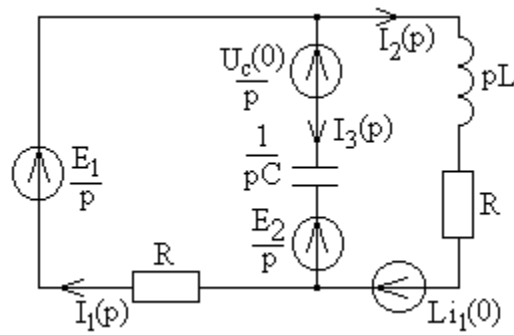


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

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

$$i_{3\text{дк}} := 0$$

$$u_{\text{Cдк}} := E_2 \quad u_{\text{Cдк}} = 50 \quad u_{\text{Lдк}} := -u_{\text{Cдк}} + E_2 \quad u_{\text{Lдк}} = 0$$

Початкові умови:

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

$$u_{\text{C}0} = 50$$

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

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

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

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

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

$$\Delta_1(p) \text{ float}, 5 \rightarrow -1 \cdot \frac{(4.50 \cdot p^2 + 1500 \cdot p - 1.0000 \cdot 10^5)}{p^2}$$

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

$$\Delta_2(p) \text{ float}, 5 \rightarrow 5000 \cdot \frac{(p + 20.)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float},5 \rightarrow -1 \cdot \frac{(4.50 \cdot p^2 + 1500 \cdot p - 1.0000 \cdot 10^5)}{p^1 \cdot (7.5000 \cdot p^2 + 2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5)}^1.$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float},5 \rightarrow 5000 \cdot \frac{(p + 20.)}{p^1 \cdot (7.5000 \cdot p^2 + 2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5)}^1.$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float},5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -5 \cdot \frac{(9 \cdot p + 13000.)}{(75 \cdot p^2 + 27143 \cdot p + 1428600.)}$$

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

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow 7500 \cdot \frac{(p + 20)}{(75 \cdot p^2 + 27143 \cdot p + 1428600)}$$

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

$$N_1(p) := -1 \cdot (4.50 \cdot p^2 + 1500 \cdot p - 1.0000 \cdot 10^5) \quad M_1(p) := p^1 \cdot (7.5000 \cdot p^2 + 2714.3 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5)^1.$$

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

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -297.98$$

$$p_2 = -63.923$$

$$N_1(p_0) = 1 \times 10^5$$

$$N_1(p_1) = 1.474 \times 10^5$$

$$N_1(p_2) = 1.775 \times 10^5$$

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

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

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

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float},3 \rightarrow .700 + .282 \cdot \exp(-298 \cdot t) - 1.58 \cdot \exp(-63.9 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := 7500 \cdot (p + 20)$$

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

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

$$p_1 = -63.92$$

$$p_2 = -297.98$$

$$N_L(p_1) = -3.294 \times 10^5$$

$$N_L(p_2) = -2.085 \times 10^6$$

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

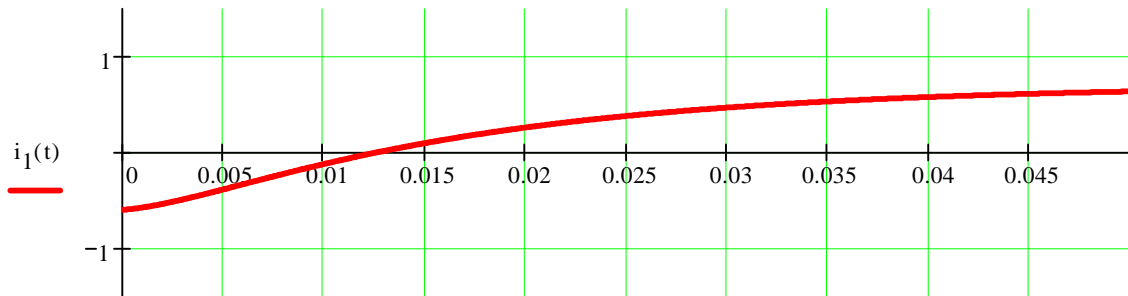
$$dM_L(p_1) = 1.756 \times 10^4$$

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

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = 100.004$$

$$u_L(t) \text{ float}, 5 \rightarrow -18.764 \cdot \exp(-63.92 \cdot t) + 118.77 \cdot \exp(-297.98 \cdot t)$$



Графік перехідного струму $i_1(t)$.

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

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

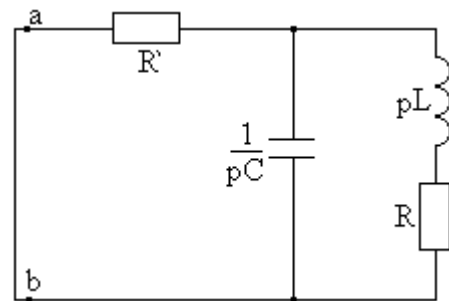
$$Z_{ab}(p) := \frac{\mathbf{R'} \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L\right) + \left(\frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot (R + p \cdot L)}{\frac{1}{p \cdot C} + R + p \cdot L}$$

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

$$D = 0$$

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

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



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:

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

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

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

$$X_C = 14.286$$

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

$$X_L = 15$$

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

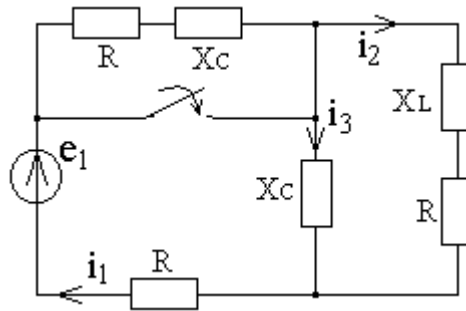
$$E_1 = -60.622 - 35i$$

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

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

$$E_2 = -43.301 - 25i$$

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



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

$$Z'_{vx} = 104.081 - 28.63i$$

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

$$I'_{1dk} = -0.455 - 0.462i$$

$$F(I'_{1dk}) = (0.648 \quad -134.62)$$

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

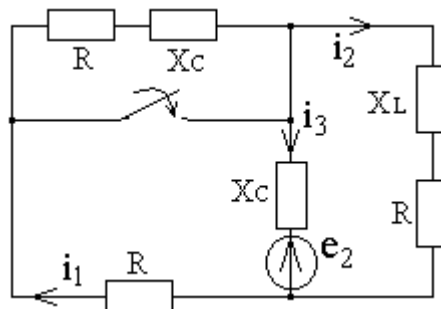
$$I'_{2dk} = -0.13 + 0.132i$$

$$F(I'_{2dk}) = (0.185 \quad 134.562)$$

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

$$I'_{3dk} = -0.325 - 0.594i$$

$$F(I'_{3dk}) = (0.677 \quad -118.739)$$



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

$$Z''_{vx} = 34.786 - 9.213i$$

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

$$I''_{3dk} = -0.985 - 0.98i$$

$$F(I''_{3dk}) = (1.389 \quad -135.166)$$

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

$$I''_{1dk} = -0.232 - 0.424i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.484 \quad -118.739)$$

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

$$I''_{2dk} = -0.753 - 0.556i$$

$$F(I''_{2dk}) = (0.936 \quad -143.568)$$

$I_{1\text{дк}} := \Gamma_{1\text{дк}} + I''_{1\text{дк}}$	$I_{1\text{дк}} = -0.688 - 0.886i$	$F(I_{1\text{дк}}) = (1.121 \quad -127.844)$
$I_{2\text{дк}} := \Gamma_{2\text{дк}} + I''_{2\text{дк}}$	$I_{2\text{дк}} = -0.883 - 0.424i$	$F(I_{2\text{дк}}) = (0.979 \quad -154.363)$
$I_{3\text{дк}} := \Gamma_{3\text{дк}} - I''_{3\text{дк}}$	$I_{3\text{дк}} = 0.66 + 0.386i$	$F(I_{3\text{дк}}) = (0.764 \quad 30.333)$
$u_{\text{Cдк}} := I_{3\text{дк}} \cdot (-i \cdot X_{\text{C}})$	$u_{\text{Cдк}} = 5.515 - 9.426i$	$F(u_{\text{Cдк}}) = (10.921 \quad -59.667)$
$u_{\text{Lдк}} := I_{1\text{дк}} \cdot i \cdot X_{\text{L}}$	$u_{\text{Lдк}} = 13.283 - 10.32i$	$F(u_{\text{Lдк}}) = (16.821 \quad -37.844)$
$i_{1\text{дк}}(t) := I_{1\text{дк}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{1\text{дк}}))$		
$i_{2\text{дк}}(t) := I_{2\text{дк}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{2\text{дк}}))$		
$i_{3\text{дк}}(t) := I_{3\text{дк}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{3\text{дк}}))$		
$u_{\text{Cдк}}(t) := u_{\text{Cдк}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(u_{\text{Cдк}}))$		
$u_{\text{Lдк}}(t) := u_{\text{Lдк}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(u_{\text{Lдк}}))$		

Початкові умови:

$$u_{\text{Cдк}}(0) = -13.331$$

$$i_{20} = -0.599$$

Given

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

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

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

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

$$i_{10} = -0.016$$

$$i_{20} = -0.599$$

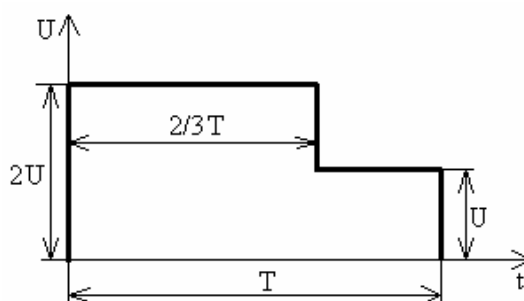
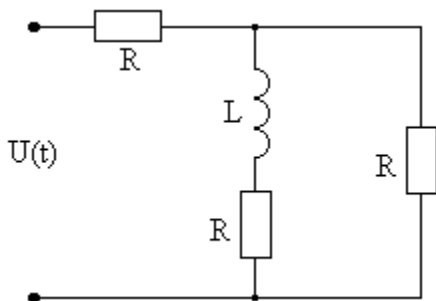
$$i_{30} = 0.583$$

$$u_{\text{L0}} = -18.727$$

$$u_{\text{C0}} = -13.331$$

Інтеграл Дюамеля

$$T := 1.5 \quad E_1 := 70 \quad E := 1$$



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

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

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

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:

$$U_0 := 2E_1 \quad U_0 = 140$$

$$U_1 := 2E_1 \quad U_1 = 140$$

$$0 < t < \frac{2T}{3}$$

$$U_2 := E_1 \quad U_2 = 70$$

$$\frac{2T}{3} < t < T$$

$$U_3 := 0$$

$$T < t < \infty$$

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

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

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

$$i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 1.87 - .467 \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

$$i_2(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{2T}{3}\right)$$

$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,5} \end{array} \right. \rightarrow .93333 - .46667 \cdot \exp(-500 \cdot t) + .23333 \cdot \exp(-500 \cdot t + 1.)$$

$$i_3(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + (U_2 - U_1) \cdot g_{11}\left(t - \frac{2T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot g_{11}(t - T)$$

$$i_3(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -.467 \cdot \exp(-500 \cdot t) + .233 \cdot \exp(-500 \cdot t + 1.) + .233 \cdot \exp(-500 \cdot t + 1.50)$$

Напряга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

$$u_{L1}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 70.000 \cdot \exp(-500 \cdot t)$$

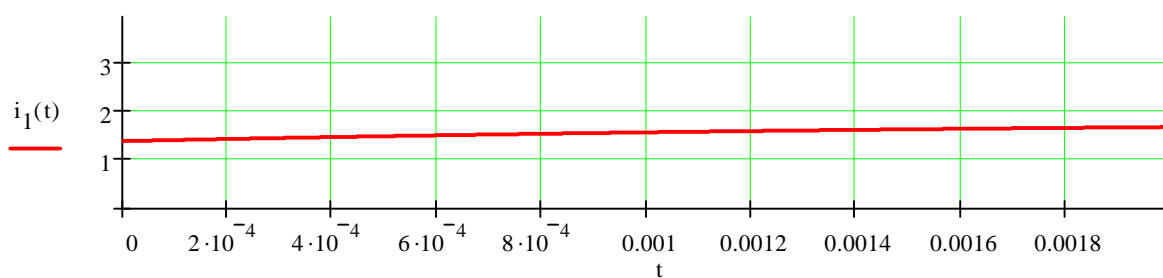
$$u_{L2}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right)$$

$$u_{L2}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 70.000 \cdot \exp(-500 \cdot t) - 35.000 \cdot \exp(-500 \cdot t + 1.0000)$$

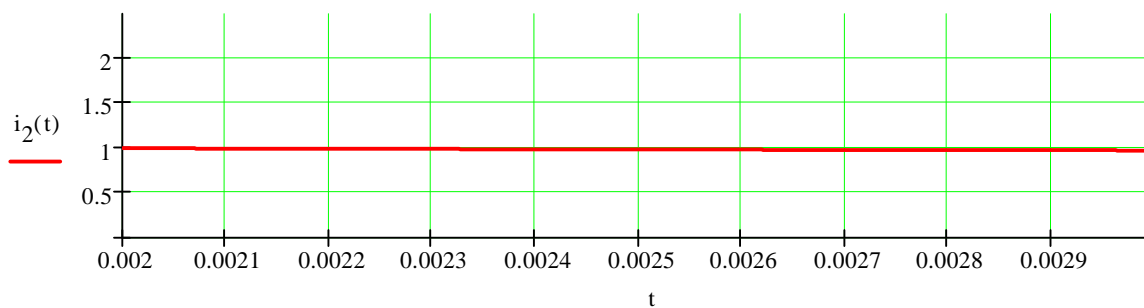
$$u_{L3}(t) := U_0 \cdot h_{uL}(t) + (U_2 - U_1) \cdot h_{uL}\left(t - \frac{2T}{3}\right) + (U_3 - U_2) \cdot h_{uL}(t - T)$$

$$u_{L3}(t) \text{ float}, 5 \rightarrow 70.000 \cdot \exp(-500 \cdot t) - 35.000 \cdot \exp(-500 \cdot t + 1.0000) - 35.000 \cdot \exp(-500 \cdot t + 1.5000)$$

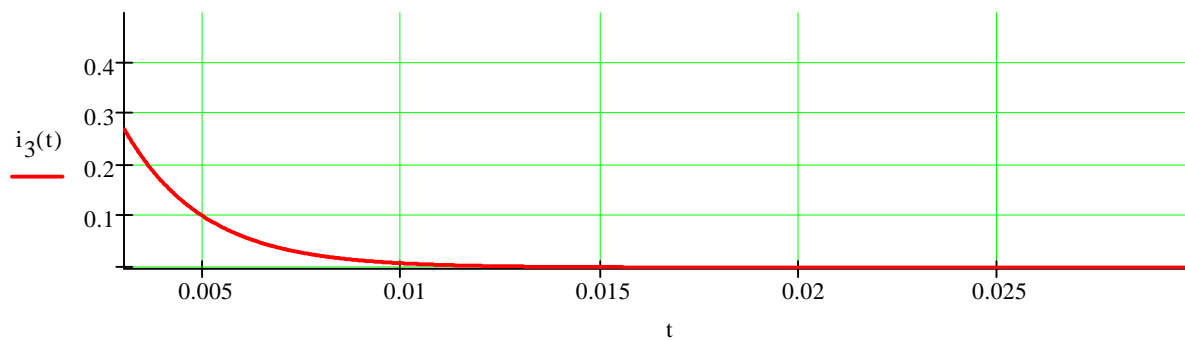
На проміжку від 0 до $2/3T$



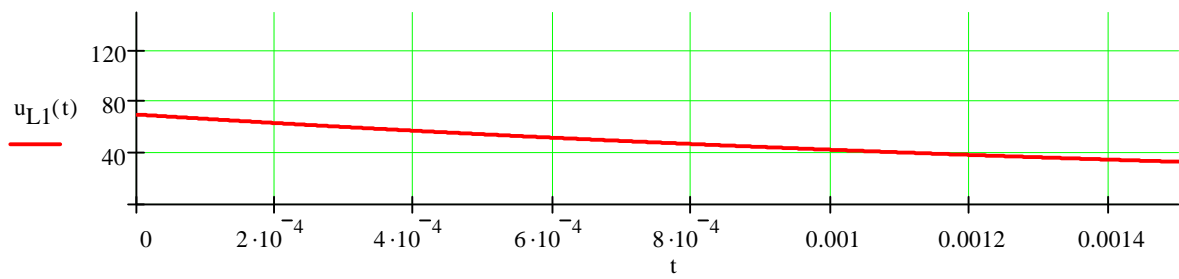
На проміжку від $2/3T$ до T



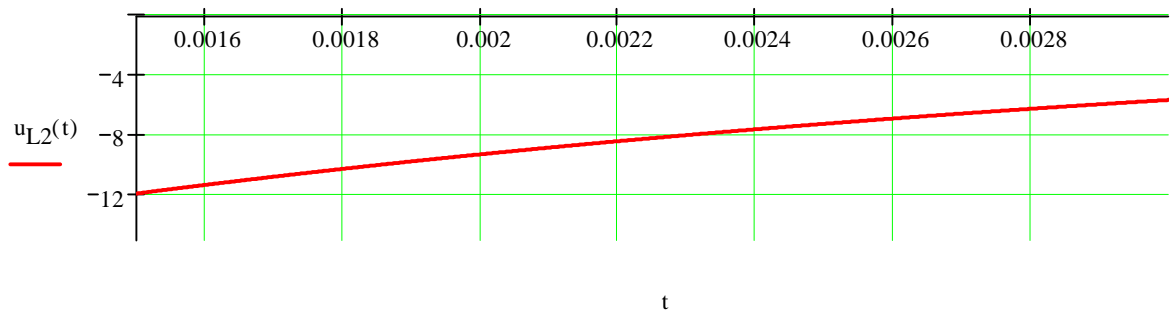
На проміжку від T до $10T$



На промежутке от 0 до $2/3T$



На промежутке от $2/3T$ до T



На промежутке от T до $10T$

