

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

Розрахунково-графічна робота

“Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах”

Варіант № 413

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.

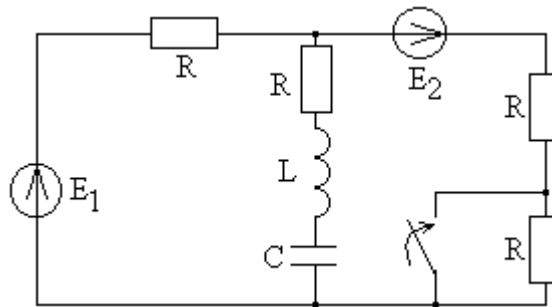
3. В післякомутаційній схемі закортити джерело ЕДС E_2 .

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.



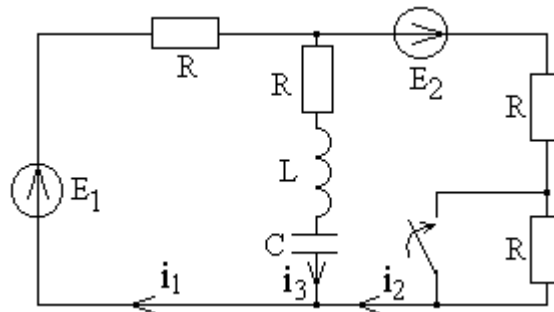
Основна схема

Вхідні данні:

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

Класичний метод

Оберемо додатній напрямок струмів у вітках схеми:



Знайдемо значення струмів та напруг безпосередньо до комутації:

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{ДК}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{ДК}} := i_{1\text{ДК}} \quad i_{2\text{ДК}} = 1$$

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

$$u_{C\text{ДК}} := E_1 - i_{1\text{ДК}} \cdot R \quad u_{C\text{ДК}} = 40$$

Усталений режим після комутації: $t = \infty$

$$i'_1 := \frac{E_1 + E_2}{2 \cdot R} \quad i'_2 := i'_1 \quad i'_2 = 1.5$$

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

$$u'_C := E_1 - i'_1 \cdot R \quad u'_C = 15$$

Незалежні початкові умови

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

$$u_{C0} := u_{C\text{ДК}} \quad u_{C0} = 40$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$$E_2 = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0} - u_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0}) \text{ float}, 7 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.500000 \\ 1.500000 \\ -25. \end{pmatrix}$$

$$i_{10} = 1.5 \quad i_{20} = 1.5 \quad u_{L0} = -25$$

Незалежні початкові умови

$$di_{30} := \frac{u_{L0}}{L} \quad di_{30} = -166.667$$

$$du_{C0} := \frac{i_{30}}{C} \quad du_{C0} = 0$$

Залежні початкові умови

Given

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

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

$$0 = di_{20} \cdot R - di_{30} \cdot R - du_{C0} - du_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} di_{10} \\ di_{20} \\ du_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(di_{10}, di_{20}, du_{L0})$$

$$di_{10} = -83.333 \quad di_{20} = 83.333 \quad du_{L0} = 1.25 \times 10^4$$

Вільний режим після комутайії: $t = 0$

Складемо характеристичне рівняння схеми

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

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := R \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + \left(2 \cdot R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \cdot R \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -480.17 \\ -19.834 \end{pmatrix}$$

Одже корні характеристичного рівняння мають вигляд:

$$p_1 = -480.17$$

$$p_2 = -19.834$$

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

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

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

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(A_1, A_2) \quad A_1 = 0.181 \quad A_2 = -0.181$$

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

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

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \text{ float, 7} \rightarrow 1.500000 + .1810272 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) - .1810272 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \quad i_1(0) = 1.5$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(B_1, B_2) \quad B_1 = -0.181 \quad B_2 = 0.181$$

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

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

$$i_2(t) := i_2' + i_2''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 1.500000 - .1810272 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) + .1810272 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \quad i_2(0) = 1.5$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(C_1, C_2) \quad C_1 = 0.362 \quad C_2 = -0.362$$

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

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

$$i_3(t) := i_3' + i_3''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow .3620544 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) - .3620544 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \quad i_3(0) = 0$$

Given

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

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

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(D_1, D_2) \quad D_1 = -1.077 \quad D_2 = 26.077$$

Отже вільна складова напруга на конденсаторі буде мати вигляд:

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

$$u_C(t) := u_C' + u_C''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow 15. - 1.077148 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) + 26.07715 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \quad u_C(0) = 40$$

Given

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

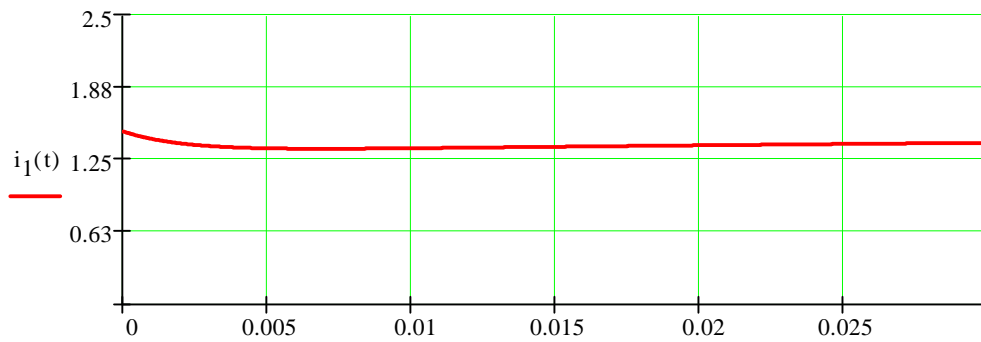
$$du_{L0} - 0 = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(F_1, F_2) \quad F_1 = -26.077 \quad F_2 = 1.077$$

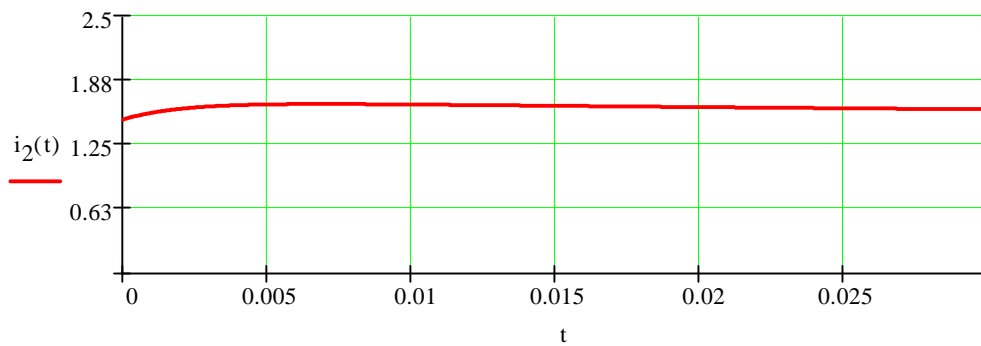
Отже вільна складова напруга на індуктивності буде мати вигляд:

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

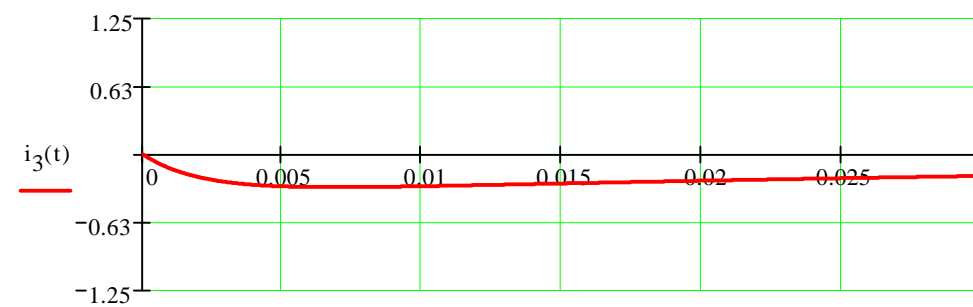
$$u_L(t) := u_L' + u_L''(t) \text{ float}, 7 \rightarrow -26.07693 \cdot \exp(-480.17 \cdot t) + 1.076931 \cdot \exp(-19.834 \cdot t) \quad u_L(0) = -25$$



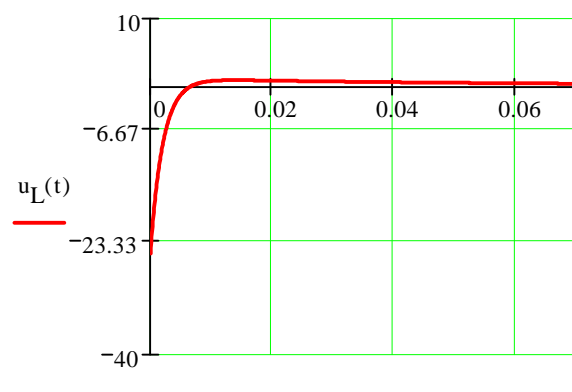
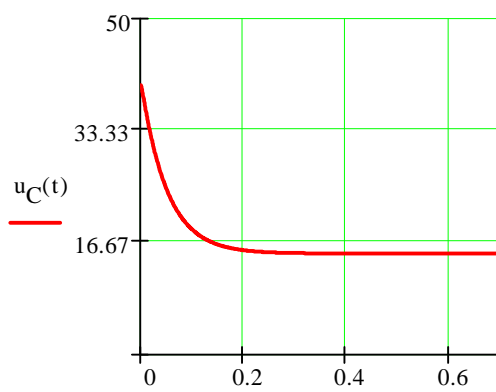
Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідного струму $i_2(t)$.

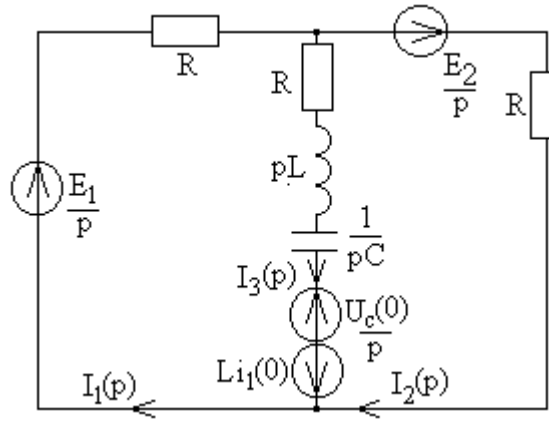


Графік перехідного струму $i_3(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Операторний метод



Операторна схема

Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{E_1 + E_2}{3 \cdot R} \quad i_{2\text{дк}} := i_{1\text{дк}} \quad i_{2\text{дк}} = 1$$

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

$$u_{C\text{дк}} := E_1 - i_{1\text{дк}} \cdot R \quad u_{C\text{дк}} = 40$$

Початкові умови:

$$i_{L0} := i_{3\text{дк}} \quad i_{L0} = 0$$

$$u_{C0} = 40$$

$$I_{k1}(p) \cdot \left(R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) - I_{k2}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) = \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0}$$

$$-I_{k1}(p) \cdot \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) + I_{k2}(p) \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \right) = \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0}$$

$$\Delta(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{1}{p^1} \cdot (7500.0 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 15.00 \cdot p^2)$$

$$\Delta_1(p) := \begin{vmatrix} \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} & -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) \\ \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} & \frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + 2 \cdot R \end{vmatrix} \quad \Delta_1(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(2.1429 \cdot 10^5 + 22.50 \cdot p^2 + 10000. \cdot p)}{p^2}$$

$$\Delta_2(p) := \begin{vmatrix} R + R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} & \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C0}}{p} + L \cdot i_{L0} \\ -\left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C} \right) & \frac{E_2}{p} + \frac{u_{C0}}{p} - L \cdot i_{L0} \end{vmatrix} \quad \Delta_2(p) \text{ float,5} \rightarrow \frac{(2.1429 \cdot 10^5 + 22.50 \cdot p^2 + 12500. \cdot p)}{p^2}$$

Контурні струми та напруга на конденсаторі будуть мати вигляд:

$$I_{k1}(p) := \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} \quad I_1(p) := I_{k1}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(2.1429 \cdot 10^5 + 22.50 \cdot p^2 + 10000 \cdot p)}{p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 15.00 \cdot p^2)^1}$$

$$I_{k2}(p) := \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} \quad I_2(p) := I_{k2}(p) \text{ float}, 5 \rightarrow \frac{(2.1429 \cdot 10^5 + 22.50 \cdot p^2 + 12500 \cdot p)}{p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 15.00 \cdot p^2)^1}$$

$$I_3(p) := I_{k1}(p) - I_{k2}(p) \left| \begin{array}{l} \text{float}, 5 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \frac{-166.66666666666667}{(500 \cdot p + 9524 + p^2)}$$

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

$$u_C(p) \text{ factor} \rightarrow \frac{40}{21} \cdot \frac{(10500 \cdot p + 75004 + 21 \cdot p^2)}{p \cdot (500 \cdot p + 9524 + p^2)}$$

$$u_L(p) := L \cdot p \cdot I_3(p) - L \cdot i_{3\text{дк}}$$

$$u_L(p) \text{ factor} \rightarrow -25 \cdot \frac{p}{(500 \cdot p + 9524 + p^2)}$$

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

$$N_1(p) := (2.1429 \cdot 10^5 + 22.50 \cdot p^2 + 10000 \cdot p) \quad M_1(p) := p^1 \cdot (7500.0 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 15.00 \cdot p^2)^1$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -480.17 \\ -19.835 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -480.17$$

$$p_2 = -19.835$$

$$N_1(p_0) = 2.143 \times 10^5$$

$$N_1(p_1) = 6.003 \times 10^5$$

$$N_1(p_2) = 2.479 \times 10^4$$

$$dM_1(p) := \frac{d}{dp} M_1(p) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow 15000 \cdot p + 1.4286 \cdot 10^5 + 45 \cdot p^2$$

$$dM_1(p_0) = 1.429 \times 10^5 \quad dM_1(p_1) = 3.316 \times 10^6$$

$$dM_1(p_2) = -1.37 \times 10^5$$

Отже струм як функція часу буде мати вигляд:

$$i_1(t) := \frac{N_1(p_0)}{dM_1(p_0)} + \frac{N_1(p_1)}{dM_1(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_1(p_2)}{dM_1(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \text{ float}, 3 \rightarrow 1.50 + .181 \cdot \exp(-480 \cdot t) - .181 \cdot \exp(-19.8 \cdot t)$$

Для напруги на конденсаторі $U_C(p)$:

$$N_u(p) := \frac{40}{21} \cdot (10500 \cdot p + 75004 + 21 \cdot p^2)$$

$$M_u(p) := p \cdot (500 \cdot p + 9524 + p^2)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_u(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve}, p \\ \text{float}, 5 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ -19.84 \\ -480.16 \end{pmatrix}$$

$$p_0 = 0$$

$$p_1 = -19.84$$

$$p_2 = -480.16$$

$$N_u(p_0) = 1.429 \times 10^5 \quad N_u(p_1) = -2.382 \times 10^5 \quad N_u(p_2) = -2.382 \times 10^5$$

$$dM_u(p) := \frac{d}{dp} M_u(p) \text{ factor} \rightarrow 1000 \cdot p + 9524 + 3 \cdot p^2$$

$$dM_u(p_0) = 9.524 \times 10^3 \quad dM_u(p_1) = -9.135 \times 10^3 \quad dM_u(p_2) = 2.21 \times 10^5$$

Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_C(t) := \frac{N_u(p_0)}{dM_u(p_0)} + \frac{N_u(p_1)}{dM_u(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_u(p_2)}{dM_u(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_C(0) = 39.997$$

$$u_C(t) \text{ float, 5} \rightarrow 15.000 + 26.074 \cdot \exp(-19.84 \cdot t) - 1.0777 \cdot \exp(-480.16 \cdot t)$$

Для напруги на індуктивності:

$$N_L(p) := -25 \cdot p \quad M_L(p) := 500 \cdot p + 9524 + p^2$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} := M_L(p) \left| \begin{array}{l} \text{solve, p} \\ \text{float, 5} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} -19.84 \\ -480.16 \end{pmatrix} \quad p_1 = -19.84 \quad p_2 = -480.16$$

$$N_L(p_1) = 496 \quad N_L(p_2) = 1.2 \times 10^4$$

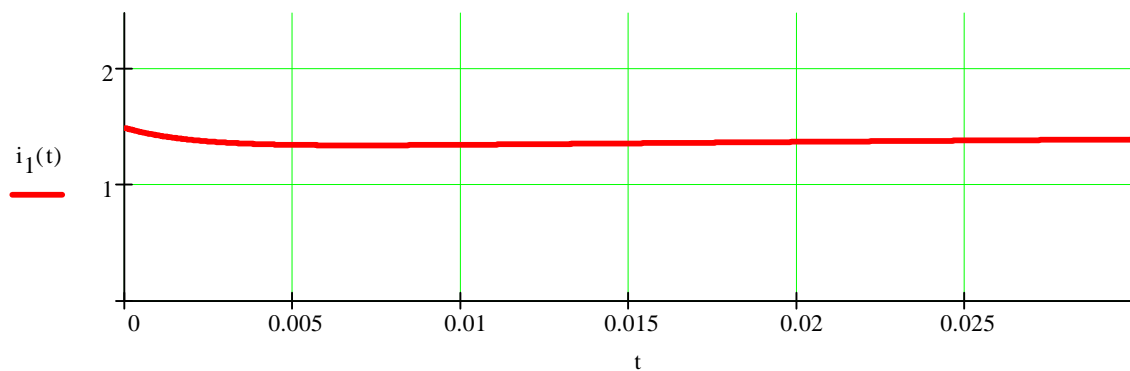
$$dM_L(p) := \frac{d}{dp} M_L(p) \text{ factor} \rightarrow 500 + 2 \cdot p$$

$$dM_L(p_1) = 460.32 \quad dM_L(p_2) = -460.32$$

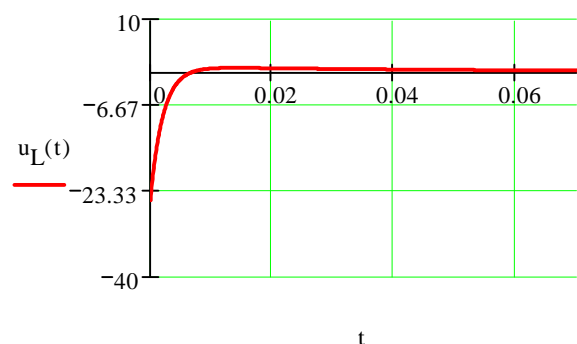
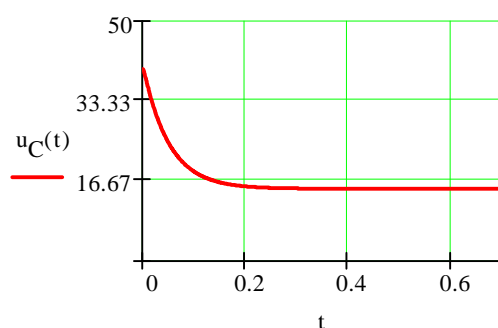
Отже напруга як функція часу буде мати вигляд:

$$u_L(t) := \frac{N_L(p_1)}{dM_L(p_1)} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{N_L(p_2)}{dM_L(p_2)} \cdot e^{p_2 \cdot t} \quad u_L(0) = -25$$

$$u_L(t) \text{ float, 5} \rightarrow 1.0775 \cdot \exp(-19.84 \cdot t) - 26.078 \cdot \exp(-480.16 \cdot t)$$



Графік перехідного струму $i_1(t)$.



Графік перехідних напруг на ємності та індуктивності.

Дослідити чому повинен дорівнювати активний опір вітки с джерелом ЕРС E1 щоб аперіодичний процес переходив у коливальний

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

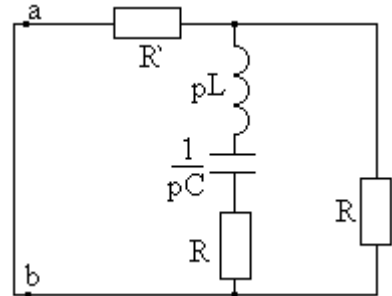
$$Z_{ab}(p) := \frac{\left(\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R\right) \cdot \mathbf{R'} + \left(R + p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}\right) \cdot R}{\frac{1}{p \cdot C} + p \cdot L + R + R}$$

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

$$D = 0$$

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

$$\left(2 \cdot R \cdot R' + R^2\right)^2 - 4 \cdot (R' \cdot L + R \cdot L) \cdot \left(\frac{R'}{C} + \frac{R}{C}\right) \Bigg|_{\text{solve}, R'}^{\text{float}, 5} \rightarrow \begin{pmatrix} -30.662 \\ -14.651 \end{pmatrix}$$



Визначити струми віток і напруги на реактивних елементах у момент комутації (t=0), якщо замість джерел постійної напруги E1 і E2 у колі діють джерела синусоїдної напруги:

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

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

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

$$X_C = 7.143$$

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

$$X_L = 30$$

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

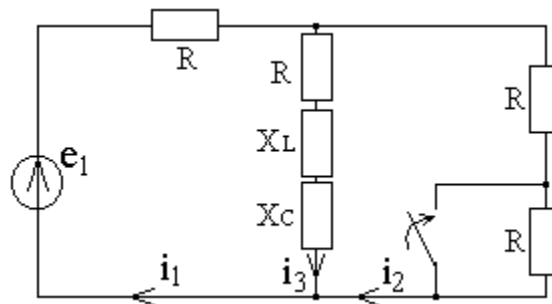
$$E_1 = 63.64 + 63.64i$$

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

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

$$E_2 = 42.426 + 42.426i$$

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



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

$$Z'_{vx} = 84.846 + 9.928i$$

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

$$\Gamma'_{1\text{дк}} = 0.827 + 0.653i$$

$$F(\Gamma'_{1\text{дк}}) = (1.054 \ 38.326)$$

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

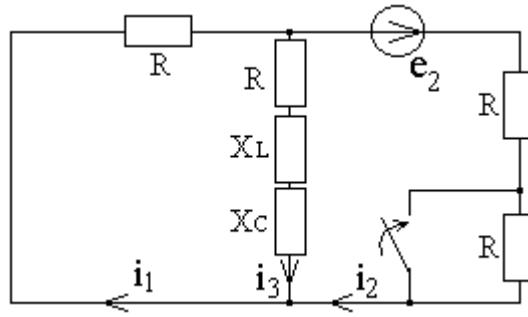
$$\Gamma'_{2\text{дк}} = 0.223 + 0.31i$$

$$F(\Gamma'_{2\text{дк}}) = (0.382 \ 54.229)$$

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

$$\Gamma'_{3\text{дк}} = 0.603 + 0.344i$$

$$F(\Gamma'_{3\text{дк}}) = (0.694 \ 29.662)$$



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

$$Z''_{vx} = 126.241 + 5.431i$$

$$I''_{2dk} := \frac{E_2}{Z''_{vx}}$$

$$I''_{2dk} = 0.35 + 0.321i$$

$$F(I''_{2dk}) = (0.475 \quad 42.537)$$

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

$$I''_{1dk} = 0.149 + 0.206i$$

$$F(I''_{1dk}) = (0.254 \quad 54.229)$$

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

$$I''_{3dk} = 0.201 + 0.115i$$

$$F(I''_{3dk}) = (0.231 \quad 29.662)$$

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

$$I_{1dk} = 0.975 + 0.86i$$

$$F(I_{1dk}) = (1.3 \quad 41.4)$$

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

$$I_{2dk} = 0.573 + 0.631i$$

$$F(I_{2dk}) = (0.852 \quad 47.745)$$

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

$$I_{3dk} = 0.402 + 0.229i$$

$$F(I_{3dk}) = (0.463 \quad 29.662)$$

$$u_{Cdk} := I_{3dk} \cdot (-i \cdot X_C)$$

$$u_{Cdk} = 1.636 - 2.873i$$

$$F(u_{Cdk}) = (3.306 \quad -60.338)$$

$$u_{Ldk} := I_{3dk} \cdot i \cdot X_L$$

$$u_{Ldk} = -6.872 + 12.067i$$

$$F(u_{Ldk}) = (13.887 \quad 119.662)$$

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

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

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

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

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

Початкові умови:

$$u_{Cdk}(0) = -4.063$$

$$i_{Ldk}(0) = 0.324$$

Given

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

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

$$e_2(0) = i_{20} \cdot R - i_{30} \cdot R - u_{C0} - u_{L0}$$

$$\begin{pmatrix} i_{10} \\ i_{20} \\ u_{L0} \end{pmatrix} := \text{Find}(i_{10}, i_{20}, u_{L0})$$

$$i_{10} = 1.662$$

$$i_{20} = 1.338$$

$$i_{30} = 0.324$$

$$u_{L0} = -5.234$$

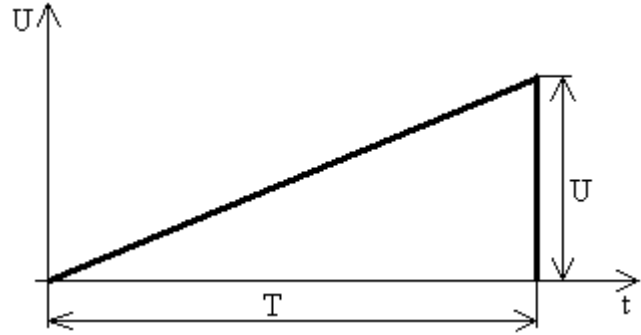
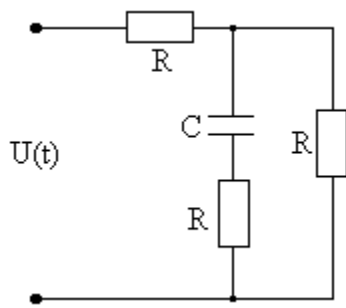
$$u_{C0} = -4.063$$

Інтеграл Дюамеля

$$T := 0.9$$

$$E_1 := 90$$

$$E := 1$$



Усталений режим до комутації: $t < 0$

$$i_{1\text{дк}} := \frac{0}{R + R}$$

$$i_{1\text{дк}} = 0$$

$$i_{3\text{дк}} := i_{1\text{дк}}$$

$$i_{3\text{дк}} = 0$$

$$i_{2\text{дк}} := 0$$

$$i_{2\text{дк}} = 0$$

$$u_{\text{Cдк}} := 0$$

$$u_{\text{Cдк}} = 0$$

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

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

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

$$p := R \cdot \left(2 \cdot R + \frac{1}{p \cdot C} \right) + R \cdot \left(\frac{1}{p \cdot C} + R \right) \Bigg|_{\text{solve}, p}^{\text{float}, 5} \rightarrow -19.048$$

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

$$T = 0.047$$

Одже корень характеристичного рівняння має вигляд:

$$p = -19.048$$

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:

$$i_1(t) := i'_1 + i''_1(t) \quad i_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-19.048 \cdot t)$$

$$i_2(t) := i'_2 + i''_2(t) \quad i_2(t) \text{ float,5} \rightarrow 6.6667 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-19.048 \cdot t)$$

$$g_{11}(t) := i_1(t) \quad g_{11}(t) \text{ float,5} \rightarrow 1.0000 \cdot 10^{-2} + 3.3333 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-19.048 \cdot t)$$

$$h_{cU}(t) := E \cdot \frac{R}{R + R} \cdot (1 - e^{pt}) \text{ float,5} \rightarrow .50000 - .50000 \cdot \exp(-19.048 \cdot t)$$

Визначимо закони зміни напруги на всіх проміжках часу:

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

$$U_1(t) := U_0 + \frac{E_1}{T} \cdot t \quad U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 1904.8 \cdot t \quad 0 < t < T$$

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

$$U'_1 := \frac{d}{dt} U_1(t) \text{ float,5} \rightarrow 1904.8 \quad U'_2 := 0$$

Струм на цих проміжках буде мати вигляд:

$$i_1(t) := U_0 \cdot g_{11}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot g_{11}(t - \tau) d\tau \quad i_1(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow 19.0 \cdot t + .333 - .333 \cdot \exp(-19.0 \cdot t)$$

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

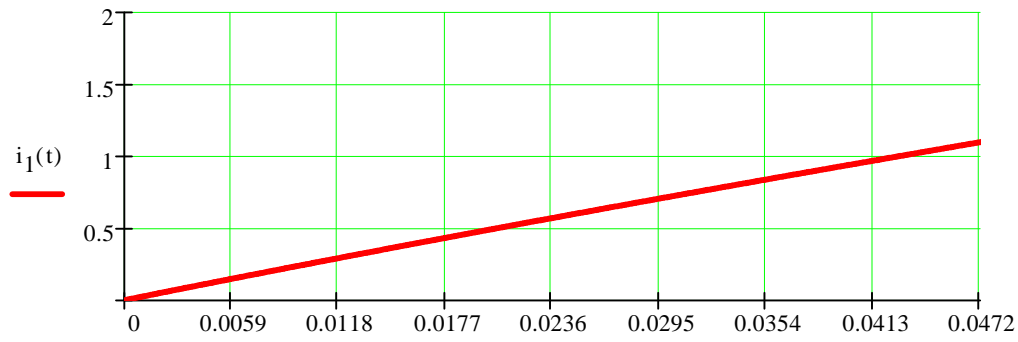
$$i_2(t) \left| \begin{array}{l} \text{factor} \\ \text{float,3} \end{array} \right. \rightarrow -1.00 \cdot 10^{-20} + 3.33 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-19.0 \cdot t + .900) - .333 \cdot \exp(-19.0 \cdot t)$$

Напруга на індуктивності на цих проміжках буде мати вигляд:

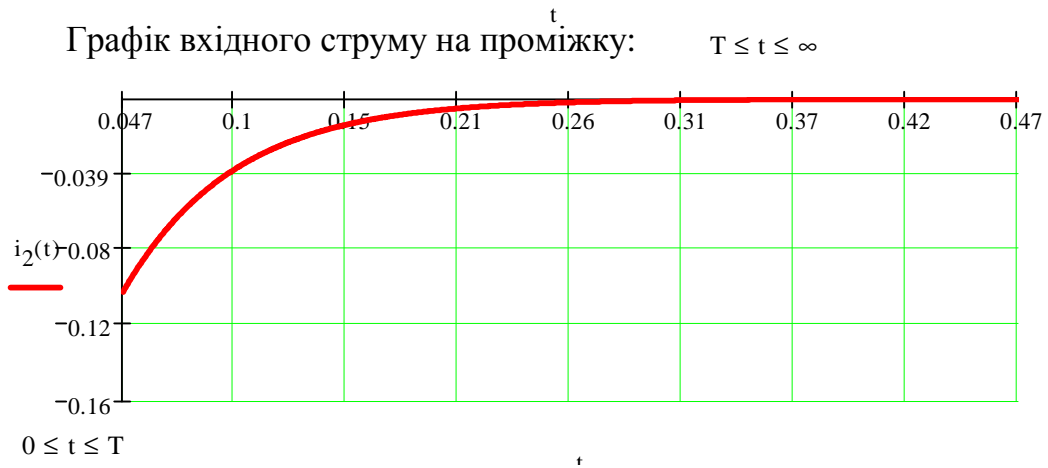
$$u_{C1}(t) := U_0 \cdot h_{cU}(t) + \int_0^t U'_1 \cdot h_{cU}(t - \tau) d\tau \text{ float,4} \rightarrow 952.4 \cdot t - 50. + 50. \cdot \exp(-19.05 \cdot t)$$

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

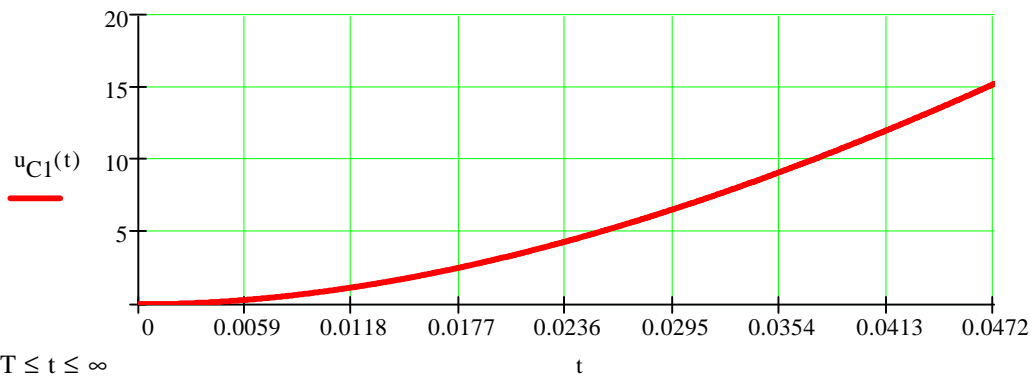
Графік вхідного струму на проміжку: $0 \leq t \leq T$



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



$0 \leq t \leq T$



$T \leq t \leq \infty$

