

***Министерство образования и науки Украины
Национальный технический университет Украины
“Киевский Политехнический Институт”
Кафедра ТОЭ***

***Расчетно-графическая работа
“Периодические несинусоидальные токи в линейных
электрических цепях”
Вариант № 403***

Выполнил: _____

Проверил: _____

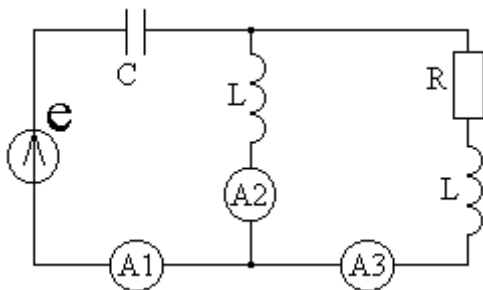
Задание

В электрической цепи, схема которой изображена на рисунке, действует источник периодической несинусоидальной ЭДС. График ЭДС задан кривой. Нелинейный отрезок кривой представляют собой участки синусоиды. Угловая частота изменения ЭДС $\omega = 1000$ рад/с.

Требуется:

1. Разложить заданную ЭДС в ряд Фурье (ограничиться 1-ой, 3-ей и 5-ой гармониками).
2. Построить в одной системе координат временные графики составляющих и суммарную кривую ЭДС, последнюю сравнить с заданной.
3. Рассчитать мгновенные значения токов всех ветвей заданной схемы.
4. Определить показания амперметров электромагнитной системы, включенных в цепь.
5. Вычислить мощность P , Q , S , T и коэффициент мощности источника. Составить баланс активных мощностей цепи.
6. Считая заданную схему одной из фаз симметричной трехфазной цепи при соединении генератора и нагрузки звездой с нулевым проводом, необходимо:
 - а) Записать выражения мгновенных значений ЭДС во всех фазах трехфазного источника (принять заданную ЭДС в качестве ЭДС фазы А),
 - б) Определить действующие значения линейного напряжения источника и тока в нейтральном проводе,
 - в) Вычислить действующие значения напряжения между нейтральными точками генератора и приемника и токов в линейных проводах при обрыве нейтрального провода.

$$E_m := 110 \quad R := 35 \quad L := 10 \quad C := 8 \quad \omega := 1000$$



Общая схема цепи

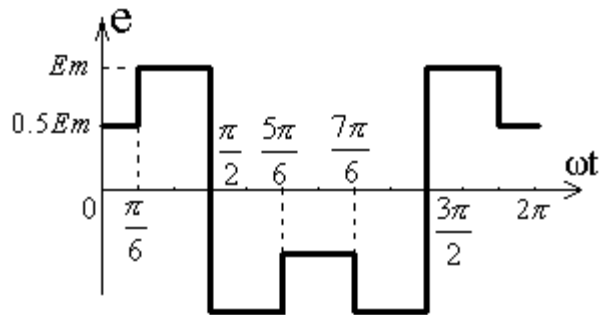


График ЭДС

Разложение заданной ЭДС в ряд Фурье.

Данная функция является симметричной относительно оси. Ряд Фурье такой функции не содержит синусоидных составляющих:

$$f(wt) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_{mk} \cos kwt \quad x = \omega t$$

$$A_0 := \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{E_m}{2} dx + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} E_m dx + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{5\pi}{6}} (-E_m) dx + \int_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} \left(-\frac{E_m}{2} \right) dx + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} (-E_m) dx + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{11\pi}{6}} E_m dx + \int_{\frac{11\pi}{6}}^{2\pi} \frac{E_m}{2} dx \right]$$

$$A_0 = -1.131 \times 10^{-15}$$

Нахождение коэффициента для 1-ой гармоники

$$C_{m1} := \frac{4}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\frac{E_m}{2} \right) \cdot \cos(x) d(x) \right] + \frac{4}{\pi} \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} (E_m) \cdot \cos(x) d(x) \right] \quad C_{m1} = 105.042$$

Нахождение коэффициентов для 3-ой гармоники

$$C_{m3} := \frac{4}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\frac{E_m}{2} \right) \cdot \cos(3x) d(x) \right] + \frac{4}{\pi} \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} (E_m) \cdot \cos(3x) d(x) \right] \quad C_{m3} = -70.028$$

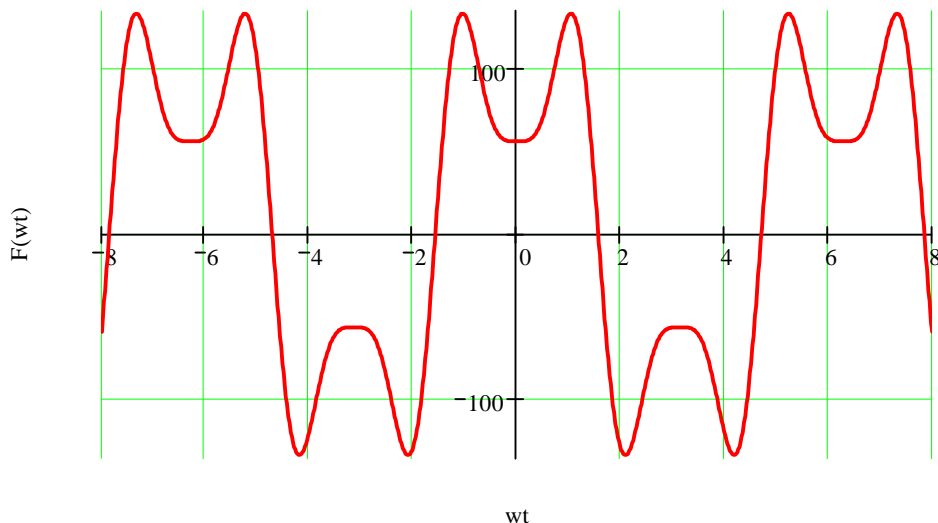
Нахождение коэффициентов для 5-ой гармоники

$$C_{m5} := \frac{4}{\pi} \cdot \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\frac{E_m}{2} \right) \cdot \cos(5x) d(x) \right] + \frac{4}{\pi} \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} (E_m) \cdot \cos(5x) d(x) \right] \quad C_{m5} = 21.008$$

Искомое разложение функции можно представить в виде:

$$F(x) := A_0 + C_{m1} \cdot \cos(x) + C_{m3} \cdot \cos(3x) + C_{m5} \cdot \cos(5x)$$

Графики составляющих и суммарной ЭДС



Временной график суммарной ЭДС разложенной в ряд Фурье

Нахождение мгновенных значений токов всех ветвей заданной схемы.

Выполнив разложение периодической несинусоидальной ЭДС в ряд Фурье, заменяем её приближенно суммой постоянной и нескольких синусоидальных составляющих:

$$e := E_0 + E_{m1} \cdot \sin\{\omega_1 \cdot t + \psi_1\} + E_{m3} \cdot \sin\{\omega_3 \cdot t + \psi_3\} + E_{m5} \cdot \sin\{\omega_5 \cdot t + \psi_5\}$$

Обозначим реактивные сопротивления цепи для К-ой гармоники:

$$X_C := \frac{1}{\omega \cdot C \cdot k \cdot 10^{-6}} \quad X_L := \omega \cdot L \cdot k \cdot 10^{-3}$$

Расчет токов, обусловленных каждой из составляющих ЭДС, выполним в комплексной форме. Комплексное сопротивление цепи для К-ой гармоники равно:

$$Z_k = -i \cdot X_C \cdot k + \frac{i \cdot X_L \cdot k \cdot (i \cdot X_L \cdot k + R)}{i \cdot X_L \cdot k + (i \cdot X_L \cdot k + R)}$$

Для основной гармоники ЭДС (K=1):

$$E_1 := \frac{C_{m1}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-i30 \frac{\pi}{180}} \quad E_1 = 64.325 - 37.138i \quad F(E_1) = (74.276 \quad -30)$$

Комплексное сопротивление цепи для 1-ой гармоники равно:

$$Z_1 := -i \cdot X_C + \frac{i \cdot X_L \cdot (i \cdot X_L + R)}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad Z_1 = 2.154 - 116.231i$$

За законом Ома находим ток I1:

$$I_{11} := \frac{E_1}{Z_1} \quad I_{11} = 0.33 + 0.547i \quad F(I_{11}) = (0.639 \quad 58.938)$$

Остальные токи находим за формулами чужого сопротивления:

$$I_{21} := I_{11} \cdot \frac{i \cdot X_L + R}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad I_{21} = 0.407 + 0.409i \quad F(I_{21}) = (0.577 \quad 45.139)$$

$$I_{31} := I_{11} \cdot \frac{i \cdot X_L}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad I_{31} = -0.077 + 0.138i \quad F(I_{31}) = (0.158 \quad 119.194)$$

Для третьей гармоники ЭДС(K=3):

$$E_3 := \frac{C_{m3}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-i30 \frac{\pi}{180}} \quad E_3 = -42.883 + 24.759i \quad F(E_3) = (49.517 \quad 150)$$

Комплексное сопротивление цепи для 3-ой гармоники равно:

$$Z_3 := -i \cdot X_C + \frac{i \cdot X_L \cdot (i \cdot X_L + R)}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad Z_3 = 6.528 - 22.858i$$

За законом Ома находим ток I1:

$$I_{13} := \frac{E_3}{Z_3} \quad I_{13} = -1.497 - 1.449i \quad F(I_{13}) = (2.083 \quad -135.94)$$

Остальные токи находим за формулами чужого сопротивления:

$$I_{23} := I_{13} \cdot \frac{i \cdot X_L + R}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad I_{23} = -1.254 - 0.582i \quad F(I_{23}) = (1.382 \quad -155.082)$$

$$I_{33} := I_{13} \cdot \frac{i \cdot X_L}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad I_{33} = -0.243 - 0.866i \quad F(I_{33}) = (0.9 \quad -105.683)$$

Для пятой гармоники ЭДС(K=5):

$$E_5 := \frac{Cm_5}{\sqrt{2}} \cdot e^{-i \cdot 30 \cdot \frac{\pi}{180}} \quad E_5 = 12.865 - 7.428i \quad F(E_5) = (14.855 \quad -30)$$

Комплексное сопротивление цепи для 3-ой гармоники равно:

$$Z_5 := -i \cdot X_C + \frac{i \cdot X_L \cdot (i \cdot X_L + R)}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad Z_5 = 7.795 + 2.728i$$

За законом Ома находим ток I1:

$$I_{1_5} := \frac{E_5}{Z_5} \quad I_{1_5} = 1.173 - 1.363i \quad F(I_{1_5}) = (1.799 \quad -49.29)$$

Остальные токи находим за формулами чужого сопротивления:

$$I_{2_5} := I_{1_5} \cdot \frac{i \cdot X_L + R}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad I_{2_5} = 0.438 - 0.939i \quad F(I_{2_5}) = (1.036 \quad -64.992)$$

$$I_{3_5} := I_{1_5} \cdot \frac{i \cdot X_L}{i \cdot X_L + (i \cdot X_L + R)} \quad I_{3_5} = 0.735 - 0.424i \quad F(I_{3_5}) = (0.849 \quad -30)$$

Мгновенные значения токов ветвей:

$$i_2 = 0.639 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 58.938) + 2.083 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 135.94) + 1.799 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 49.29)$$

$$i_2 = 0.577 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 45.139) + 1.382 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 155.082) + 1.036 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 64.992)$$

$$i_3 = 0.158 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 119.194) + 0.9 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 105.683) + 0.849 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 30)$$

Определение показаний амперметров электромагнитной системы, включенных в цепь.

$$\Gamma_1 := \sqrt{(|I_{1_1}|)^2 + (|I_{1_3}|)^2 + (|I_{1_5}|)^2} \quad \Gamma_1 = 2.825$$

$$\Gamma_2 := \sqrt{(|I_{2_1}|)^2 + (|I_{2_3}|)^2 + (|I_{2_5}|)^2} \quad \Gamma_2 = 1.821$$

$$\Gamma_3 := \sqrt{(|I_{3_1}|)^2 + (|I_{3_3}|)^2 + (|I_{3_5}|)^2} \quad \Gamma_3 = 1.247$$

Вычисление мощности P, Q, S, T и коэффициента мощности источника. Баланс активных мощностей цепи.

Активная мощность источника (на входе цепи):

$$P := |E_1| \cdot |I_{1_1}| \cdot \cos(\arg(I_{1_1}) - \arg(E_1)) + |E_3| \cdot |I_{1_3}| \cdot \cos(\arg(I_{1_3}) - \arg(E_3))$$

$$P := P + |E_5| \cdot |I_{1_5}| \cdot \cos(\arg(I_{1_5}) - \arg(E_5)) \quad P = 54.425$$

Реактивная мощность источника:

$$Q := |E_1| \cdot |I_{1_1}| \cdot \sin[-(\arg(I_{1_1}) - \arg(E_1))] + |E_3| \cdot |I_{1_3}| \cdot \sin[-(\arg(I_{1_3}) - \arg(E_3))]$$

$$Q := Q + |E_5| \cdot |I_{1_5}| \cdot \sin[-(\arg(I_{1_5}) - \arg(E_5))] \quad Q = -137.8$$

Полная мощность источника:

$$E := \sqrt{(|E_1|)^2 + (|E_3|)^2 + (|E_5|)^2} \quad S := E \cdot I_1 \quad S = 255.681$$

Мощность искажения на входе цепи:

$$T := \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad T = 208.379$$

Мощность, поступающая в активные сопротивления цепи:

$$P_a := I_3^2 \cdot R \quad P_a = 54.425$$

Считем заданную схему одной из фаз симметричной трехфазной цепи при соединении генератора и нагрузки звездой с нулевым проводом.

Выражения мгновенных значений ЭДС во всех фазах трехфазного источника (принимая заданную ЭДС в качестве ЭДС фазы А).

В симметричных трёхфазных электрических цепях кривые напряжения (тока) во второй и третьей фазах аналогичны кривой напряжения (тока) первой фазы со сдвигом на треть периода:

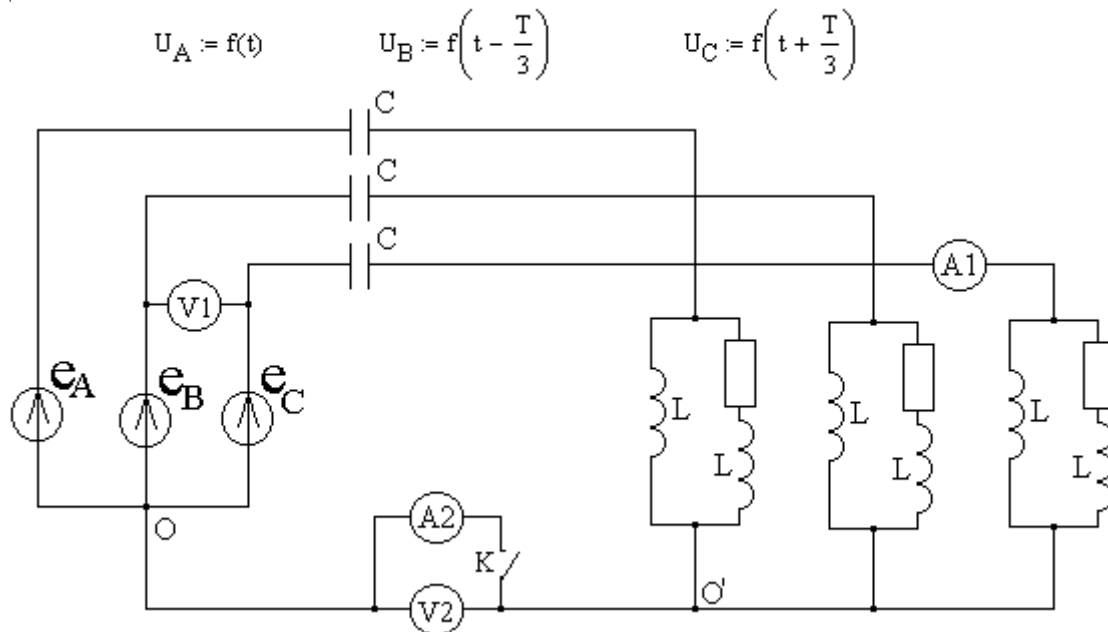


Схема трехфазной цепи

$$e_A := 105.042 \cdot \sin(\omega t) - 70.028 \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + 21.008 \cdot \sin(5 \cdot \omega t)$$

$$e_B := 105.042 \cdot \sin(\omega t - 120) - 70.028 \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + 21.008 \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 240)$$

$$e_C := 105.042 \cdot \sin(\omega t + 120) - 70.028 \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + 21.008 \cdot \sin(5 \cdot \omega t + 240)$$

Определение действующего значения линейного напряжения источника и тока в нейтральном проводе.

Действующее значение линейного напряжения источника (показание вольтметра V1):

$$U_L := \sqrt{3} \cdot \sqrt{(|E_1|)^2 + (|E_5|)^2} \quad U_L = 131.198$$

Действующее значение тока в линейном проводе (показания амперметра A2 при замкнутом ключе K):

$$I_N := 3 \cdot \sqrt{(|I_{13}|)^2} \quad I_N = 6.249$$

Определение действующего значения напряжения между нейтральными точками генератора и приемника и токов в линейных проводах при обрыве нейтрального провода.

Действующее значение напряжения между нейтральными точками генератора O и приемника O' при размыкании ключа K (показания вольтметра V2):

$$U_N := |E_3| \quad U_N = 49.517$$

Действующее значение токов в линейных проводах при обрыве нейтрального провода (показание амперметра A1):

$$I_1 := \sqrt{(|I_{11}|)^2 + (|I_{15}|)^2} \quad I_1 = 1.909$$