

***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 № 138***

Выполнил: _____

Проверил: _____

Киев 2007

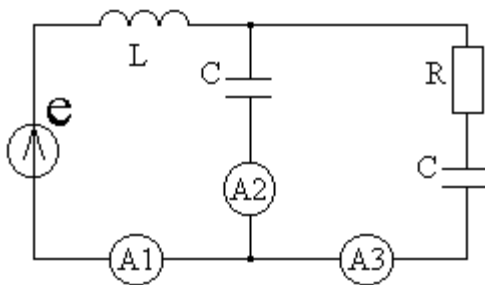
Задание

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.

$$E_m := 80 \quad R := 20 \quad L := 4 \text{ мГн} \quad C := 14 \text{ мкФ} \quad \omega := 1000$$



Общая схема цепи

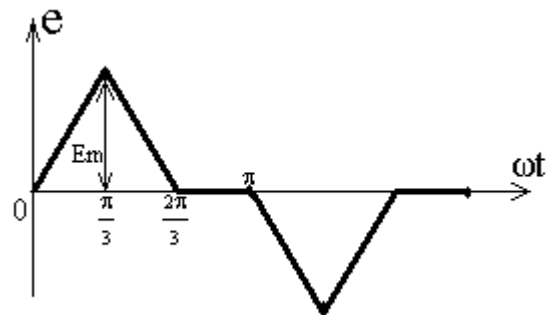


График ЭДС

Разложение заданной ЭДС в ряд Фурье.

Данная функция является симметричной относительно оси абсцисс при совмещении двух полупериодов во времени.

Ряд Фурье такой функции не содержит четных гармоник и постоянной составляющей:

$$f(\omega t) := \sum_{k=1,3,5}^{\infty} (B_{mk} \cdot \sin(k\omega t) + C_{mk} \cdot \cos(k\omega t)) \quad x = \omega t$$

Нахождение коэффициентов для 1-ой гармоники

$$B_{m1} := \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3 \cdot E_m}{\pi} \cdot x \right) \cdot \sin(x) dx \quad B_{m1} = 33.307$$

$$C_{m1} := \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3 \cdot E_m}{\pi} \cdot x \right) \cdot \cos(x) dx \quad C_{m1} = 39.578$$

$$F_1(x) := (B_{m1} \cdot \sin(x) + C_{m1} \cdot \cos(x)) \quad F_1(x) \text{ float,5} \rightarrow 33.309 \cdot \sin(x) + 39.579 \cdot \cos(x)$$

$$A_{m1} := \sqrt{B_{m1}^2 + C_{m1}^2} \quad A_{m1} = 51.728 \quad \psi_1 := \operatorname{atan}\left(\frac{C_{m1}}{B_{m1}}\right) \quad \psi_1 = 0.871$$

Нахождение коэффициентов для 3-ой гармоники

$$B_{m3} := \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3 \cdot E_m}{\pi} \cdot x \right) \cdot \sin(x \cdot 3) dx \quad B_{m3} = 33.953$$

$$C_{m3} := \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3 \cdot E_m}{\pi} \cdot x \right) \cdot \cos(x \cdot 3) dx \quad C_{m3} = -21.615$$

$$F_3(x) := (B_{m3} \cdot \sin(x \cdot 3) + C_{m3} \cdot \cos(x \cdot 3)) \quad F_3(x) \text{ float,5} \rightarrow 33.954 \cdot \sin(3 \cdot x) - 21.615 \cdot \cos(3 \cdot x)$$

$$A_{m3} := \sqrt{B_{m3}^2 + C_{m3}^2} \quad A_{m3} = 40.25 \quad \psi_3 := \operatorname{atan}\left(\frac{C_{m3}}{B_{m3}}\right) \quad \psi_3 = -0.567$$

Нахождение коэффициентов для 5-ой гармоники

$$B_{m5} := \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3 \cdot E_m}{\pi} \cdot x \right) \cdot \sin(x \cdot 5) dx \quad B_{m5} = -13.555$$

$$C_{m5} := \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3 \cdot E_m}{\pi} \cdot x \right) \cdot \cos(x \cdot 5) dx \quad C_{m5} = -19.588$$

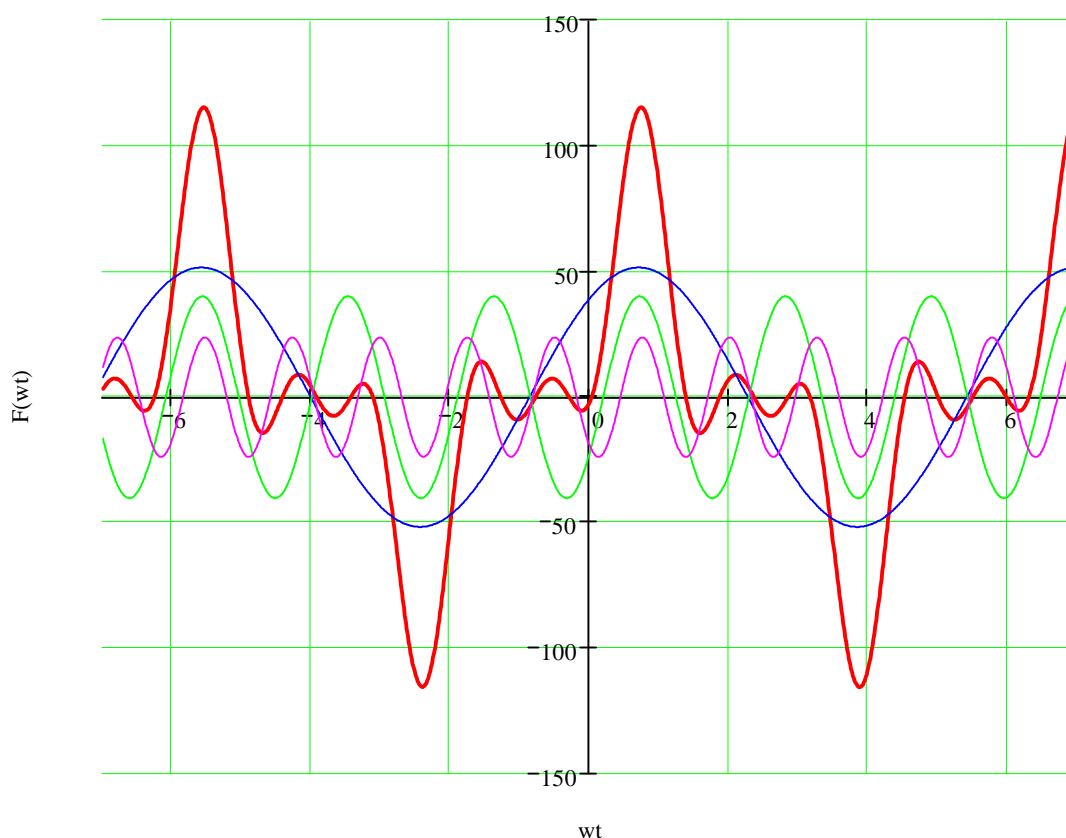
$$F_5(x) := (B_{m5} \cdot \sin(x \cdot 5) + C_{m5} \cdot \cos(x \cdot 5)) \quad F_5(x) \text{ float,5} \rightarrow -13.555 \cdot \sin(5 \cdot x) - 19.588 \cdot \cos(5 \cdot x)$$

$$A_{m5} := \sqrt{B_{m5}^2 + C_{m5}^2} \quad A_{m5} = 23.821 \quad \psi_5 := \operatorname{atan}\left(\frac{C_{m5}}{B_{m5}}\right) \quad \psi_5 = 0.965$$

Искомое разложение функции можно представить в виде:

$$F(\omega t) := A_{m1} \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + A_{m3} \cdot \sin(\omega t + \psi_3) + A_{m5} \cdot \sin(\omega t + \psi_5)$$

Графики составляющих и суммарной ЭДС



Временные графики 1-ой, 3-ей, 5-ой гармоник ЭДС и их суммарная кривая

Нахождение мгновенных значений токов всех ветвей заданной схемы.

Выполнив разложение периодической несинусоидальной ЭДС в ряд Фурье, заменяем её приближенно суммой нескольких составляющих.

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:

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

Для основной гармоники ЭДС (K=1):

$$E_1 := \frac{Am_1}{\sqrt{2}} \cdot e^{i\psi_1} \quad E_1 = 23.552 + 27.986i \quad F(E_1) = (36.578 \ 49.918)$$

Комплексное сопротивление цепи для 1-ой гармоники равно:

$$Z_1 := i \cdot X_L + \frac{-i \cdot X_C \cdot (-i \cdot X_C + R)}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad Z_1 = 4.904 - 32.401i$$

За законом Ома находим ток I₁:

$$I_{1_1} := \frac{E_1}{Z_1} \quad I_{1_1} = -0.737 + 0.838i \quad F(I_{1_1}) = (1.116 \ 131.311)$$

Остальные токи находим за формулами чужого сопротивления:

$$I_{21} := I_{11} \cdot \frac{-i \cdot X_C + R}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad I_{21} = -0.433 + 0.377i \quad F(I_{21}) = (0.574 \quad 138.984)$$

$$I_{31} := I_{11} \cdot \frac{-i \cdot X_C}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad I_{31} = -0.304 + 0.462i \quad F(I_{31}) = (0.553 \quad 123.342)$$

Для третьей гармоники ЭДС(K=3):

$$E_3 := \frac{Am_3}{\sqrt{2}} \cdot e^{i \cdot \psi_3} \quad E_3 = 24.008 - 15.284i \quad F(E_3) = (28.461 \quad -32.482)$$

Комплексное сопротивление цепи для 3-ой гармоники равно:

$$Z_3 := i \cdot X_L + \frac{-i \cdot X_C \cdot (-i \cdot X_C + R)}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad Z_3 = 4.25 - 1.69i$$

За законом Ома находим ток I1:

$$I_{13} := \frac{E_3}{Z_3} \quad I_{13} = 6.112 - 1.166i \quad F(I_{13}) = (6.222 \quad -10.799)$$

Остальные токи находим за формулами чужого сопротивления:

$$I_{23} := I_{13} \cdot \frac{-i \cdot X_C + R}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad I_{23} = 3.723 + 0.421i \quad F(I_{23}) = (3.746 \quad 6.449)$$

$$I_{33} := I_{13} \cdot \frac{-i \cdot X_C}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad I_{33} = 2.39 - 1.587i \quad F(I_{33}) = (2.868 \quad -33.582)$$

Для пятой гармоники ЭДС(K=5):

$$E_5 := \frac{Am_5}{\sqrt{2}} \cdot e^{i \cdot \psi_5} \quad E_5 = 9.585 + 13.851i \quad F(E_5) = (16.844 \quad 55.316)$$

Комплексное сопротивление цепи для 5-ой гармоники равно:

$$Z_5 := i \cdot X_L + \frac{-i \cdot X_C \cdot (-i \cdot X_C + R)}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad Z_5 = 3.356 + 10.508i$$

За законом Ома находим ток I1:

$$I_{15} := \frac{E_5}{Z_5} \quad I_{15} = 1.46 - 0.446i \quad F(I_{15}) = (1.527 \quad -16.974)$$

Остальные токи находим за формулами чужого сопротивления:

$$I_{25} := I_{15} \cdot \frac{-i \cdot X_C + R}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad I_{25} = 1.075 + 0.047i \quad F(I_{25}) = (1.076 \quad 2.496)$$

$$I_{35} := I_{15} \cdot \frac{-i \cdot X_C}{-i \cdot X_C + (-i \cdot X_C + R)} \quad I_{35} = 0.385 - 0.493i \quad F(I_{35}) = (0.625 \quad -51.966)$$

Мгновенные значения токов ветвей:

$$i_1 = 1.116 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 131.311) + 6.222 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 10.799) + 1.527 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 16.974)$$

$$i_2 = 0.574 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 138.984) + 3.746 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t + 6.449) + 1.076 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t + 2.496)$$

$$i_3 = 0.553 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 123.342) + 2.868 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 33.582) + 0.625 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 51.966)$$

Определение показаний амперметров электромагнитной системы, включенных в цепь.

$$I_1 := \sqrt{\left(|I_{11}|\right)^2 + \left(|I_{13}|\right)^2 + \left(|I_{15}|\right)^2} \quad I_1 = 6.504$$

$$I_2 := \sqrt{\left(|I_{21}|\right)^2 + \left(|I_{23}|\right)^2 + \left(|I_{25}|\right)^2} \quad I_2 = 3.94$$

$$I_3 := \sqrt{\left(|I_{31}|\right)^2 + \left(|I_{33}|\right)^2 + \left(|I_{35}|\right)^2} \quad I_3 = 2.987$$

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

Активная мощность источника (на входе цепи):

$$P := |E_1| \cdot |I_{11}| \cdot \cos\left[-\left(\arg(I_{11}) - \arg(E_1)\right)\right] + |E_3| \cdot |I_{13}| \cdot \cos\left[-\left(\arg(I_{13}) - \arg(E_3)\right)\right]$$

$$P := P + |E_5| \cdot |I_{15}| \cdot \cos\left[-\left(\arg(I_{15}) - \arg(E_5)\right)\right] \quad P = 178.499$$

Реактивная мощность источника:

$$Q := |E_1| \cdot |I_{11}| \cdot \sin\left[-\left(\arg(I_{11}) - \arg(E_1)\right)\right] + |E_3| \cdot |I_{13}| \cdot \sin\left[-\left(\arg(I_{13}) - \arg(E_3)\right)\right]$$

$$Q := Q + |E_5| \cdot |I_{15}| \cdot \sin\left[-\left(\arg(I_{15}) - \arg(E_5)\right)\right] \quad Q = -81.297$$

Полная мощность источника:

$$E := \sqrt{\left(|E_1|\right)^2 + \left(|E_3|\right)^2 + \left(|E_5|\right)^2} \quad S := E \cdot I_1 \quad S = 320.702$$

Мощность искажения на входе цепи:

$$T := \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad T = 253.73$$

Мощность, поступающая в активные сопротивления цепи:

$$P_a := I_3^2 \cdot R \quad P_a = 178.499$$

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:

$$U_A := f(t) \quad U_B := f\left(t - \frac{T}{3}\right) \quad U_C := f\left(t + \frac{T}{3}\right)$$

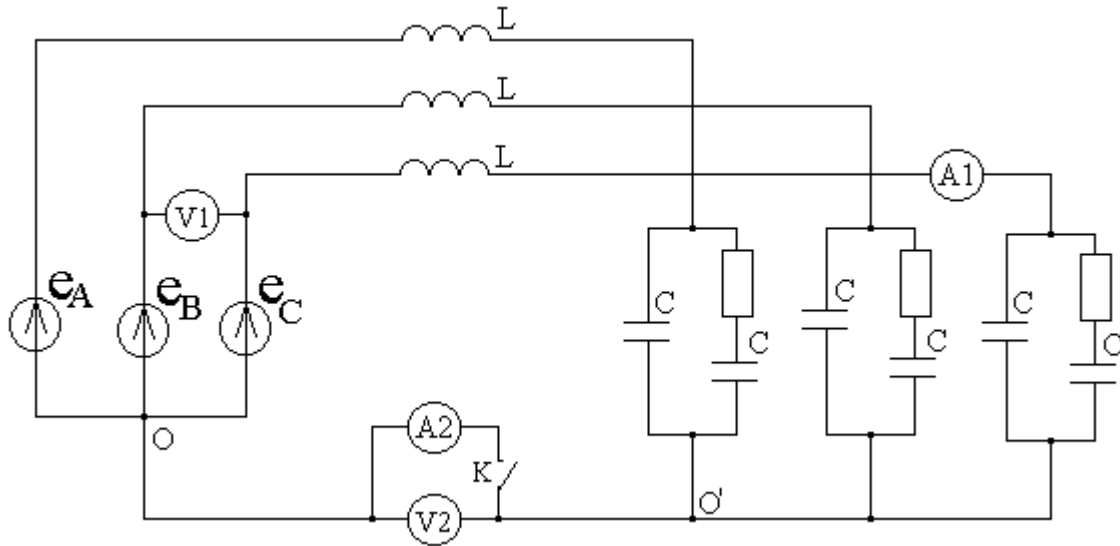


Схема трехфазной цепи

$$e_A = 51.728 \cdot \sin(\omega t + 49.918) + 40.25 \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 32.482) + 23.821 \cdot \sin(5 \cdot \omega t + 55.316)$$

$$e_B = 51.728 \cdot \sin(\omega t - 70.082) + 40.25 \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 32.482) + 23.821 \cdot \sin(5 \cdot \omega t - 184.684)$$

$$e_C = 51.728 \cdot \sin(\omega t + 169.918) + 40.25 \cdot \sin(3 \cdot \omega t - 32.482) + 23.821 \cdot \sin(5 \cdot \omega t + 295.316)$$

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

Действующее значение линейного напряжения источника (показание вольтметра V1):

$$U_L := \sqrt{3} \cdot \sqrt{(|E_1|)^2 + (|E_5|)^2} \quad U_L = 69.749$$

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

$$I_N := 3 \cdot \sqrt{(|I_{13}|)^2} \quad I_N = 18.667$$

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):

$$U_N := |E_3| \quad U_N = 28.461$$

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

$$I_1 := \sqrt{(|I_{11}|)^2 + (|I_{15}|)^2} \quad I_1 = 1.891$$