

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**



Кафедра электротехники и электроники

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Примеры расчета
контрольных заданий для студентов
всех специальностей
факультета заочного обучения
и экстерната

Часть 2

Второе издание,
переработанное и дополненное

Санкт-Петербург
2008

УДК 621.3

Афанасьева Н.А., Батяев А.А., Ерофеева И.А. Электротехника и электроника: Примеры расчета контрольных заданий для студентов всех специальностей факультета заочного обучения и экстерната. Ч. 2. 2-е изд., перераб. и доп.. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 43 с.

Приводятся расчеты и подробные пояснения к решению восьми задач.

Рецензент

Канд. техн. наук, доц. Ю.А. Рахманов

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный
университет низкотемпературных
и пищевых технологий, 2008

ЗАДАЧА 1

Задача посвящена расчету токов в сложных линейных электрических цепях с несколькими источниками **постоянного** тока. Классическим методом расчета таких цепей является непосредственное применение законов Кирхгофа. Все остальные методы расчета исходят из этих фундаментальных законов электротехники.

Напомним: **первый** закон Кирхгофа касается любого узла электрической схемы, согласно этому закону – **алгебраическая** сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

где n – число всех токов, направленных от узла и к узлу; k – порядковый номер тока.

Второй закон Кирхгофа касается любого контура электрической схемы, согласно этому закону – **алгебраическая** сумма напряжений всех участков замкнутого контура равна нулю

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0,$$

где m – число резисторов в контуре.

Применительно к схемам замещения с источниками ЭДС II закон Кирхгофа формулируется следующим образом: **алгебраическая** сумма падений напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, входящих в **этот** контур,

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k,$$

где m – число резистивных элементов; n – число источников ЭДС в контуре.

При составлении уравнений слагаемые берут со знаком «+» в случае, когда направление обхода контура совпадает с направлением тока или ЭДС, в противном случае слагаемые берут со знаком «-».

Следует помнить и закон Ома, который является самым важным законом электротехники: закон Ома для участка цепи, не содержащего источника ЭДС, устанавливает связь между током, напряжением и сопротивлением этого участка. Падение напряжения на участке ($a-b$) цепи равно

$$U_{ab} = IR,$$

где I и R – ток и сопротивление резистора на этом участке.

Рассмотрим сложную электрическую цепь (рис. 1.1), которая содержит шесть ветвей. Если будут заданы величины всех ЭДС и сопротивлений резисторов, а по условию задачи требуется определить токи в ветвях, то мы будем иметь задачу с шестью неизвестными. Такие задачи решаются при помощи законов Кирхгофа. В этом случае число составленных уравнений должно быть равно числу неизвестных токов n .

Порядок расчета:

1. Если **ветвь** цепи содержит последовательные и параллельные соединения, ее упрощают, заменяя сопротивления этих соединений эквивалентными.

2. Произвольно указывают направления токов во всех ветвях. Если в результате расчета ток получится со знаком "минус", то это значит, что направление тока было выбрано неверно.

3. Составляют $(n - 1)$ уравнений по первому закону Кирхгофа (n – число узлов всей электрической схемы).

4. Обход контура можно производить как по часовой стрелке, так и против нее. За положительные ЭДС и токи принимаются такие, направление которых совпадает с направлением обхода контура. Направление действия ЭДС внутри источника всегда принимают от минуса к плюсу (см. рис. 1.1).

5. Полученную систему уравнений решают относительно неизвестных токов. Составим расчетные уравнения для электрической цепи, изображенной на рис.1.1. Выбрав произвольно направление токов в ветвях цепи, составляем уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов a , b и c [1]:

$$\begin{aligned} \text{узел } a \quad I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ \text{узел } b \quad -I_5 - I_1 + I_4 &= 0 \\ \text{узел } c \quad -I_4 - I_2 + I_6 &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Приняв направление обхода контура, как указано на рис. 1.1, составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров:

для контура I

$$E_1 = R_1 I_1 + R_3 I_3 - R_5 I_5; \quad (2)$$

для контура II

$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_5 I_5 - R_6 I_6; \quad (3)$$

для контура III

$$0 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_4 I_4 \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (1–4), определяем токи в ветвях электрической цепи.

Легко заметить, что решение «вручную» полученной системы из шести уравнений является достаточно трудоемкой операцией. Поэтому при расчете сложных электрических цепей целесообразно применять метод контурных токов, который позволяет уменьшить число уравнений, составляемых по двум законам Кирхгофа, на число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа.

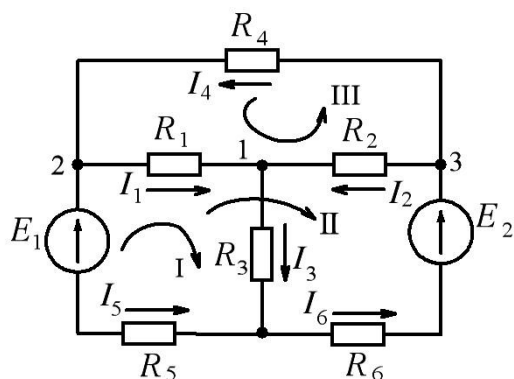


Рис. 1.1

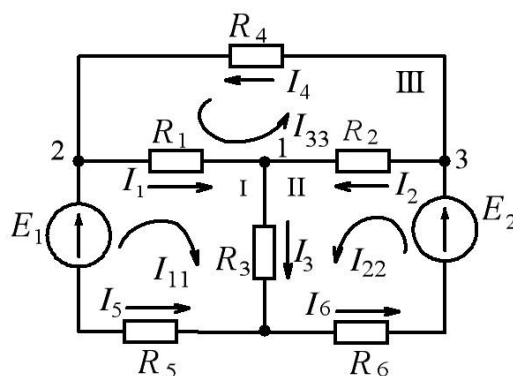


Рис. 1.2

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов ведется следующим образом:

1. Вводя понятие "контурный ток", произвольно задаем направление этих токов $-I_{11}$, I_{22} , I_{33} (рис. 1.2).

2. Составляем для каждого **независимого** контура уравнение **только по второму закону Кирхгофа** для выбранных контуров. Напомним, что независимый контур – это такой контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь (например, на рис. 1.2 – контуры I, II и III):

I контур

$$E_1 = I_{11}(R_1 + R_3 + R_5) + I_{22}R_3 + I_{33}R_1; \quad (5)$$

II контур

$$E_2 = I_{22}(R_2 + R_3 + R_6) + I_{11}R_3 - I_{33}R_2; \quad (6)$$

III контур

$$0 = I_{33}(R_1 + R_2 + R_4) + I_{11}R_1 - I_{22}R_2. \quad (7)$$

3. Решая совместно уравнения (5)–(7), определяем контурные токи.

4. Действительные токи ($I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$) в наружных ветвях схемы равны контурным (I_{11}, I_{22}, I_{33}) с учетом знака; токи в смежных ветвях схемы определяются, как **алгебраическая** сумма контурных токов, причем за исходное берется направление искомого действительного тока:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11} + I_{33}; \\ I_2 &= I_{22} - I_{33}; \\ I_3 &= I_{22} + I_{11}; \\ I_4 &= I_{33}; \\ I_5 &= -I_{11}; \\ I_6 &= I_{22} \end{aligned}$$

Пример. Рассчитать сложную цепь постоянного тока по схеме, изображенной на рис. 1.2.

Дано: $E_1 = 100$ В; $E_2 = 120$ В; $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 10$ Ом; $R_3 = 2$ Ом; $R_4 = 10$ Ом; $R_5 = R_6 = 0,5$ Ом.

Определить действительные токи в ветвях.

Решаем систему уравнений (5)–(7). Для этого введем обозначения:

$$R_{11} = R_1 + R_3 + R_5 = 5 + 2 + 0,5 = 7,5;$$

$$R_{22} = R_2 + R_3 + R_6 = 10 + 2 + 0,5 = 12,5;$$

$$R_{33} = R_1 + R_2 + R_4 = 5 + 10 + 10 = 25;$$

$$R_{12} = R_{21} = R_3 = 2;$$

$$R_{13} = R_{31} = R_1 = 5;$$

$$R_{23} = R_{32} = -R_2 = -10;$$

$$E_{11} = E_1 = 100; \quad E_{22} = E_2 = 120; \quad E_{33} = 0.$$

Перепишем уравнения (5)–(7) следующим образом:

$$\begin{cases} E_{11} = I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13}; \\ E_{22} = I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23}; \\ 0 = I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33}. \end{cases}$$

Проще всего данную систему уравнений решить с помощью компьютера, применяя специальную программу для решения системы линейных уравнений «Mathcad», имеющуюся на кафедре в компьютерном классе, если такой возможности нет – методом определителей.

1. Запишем полученную систему уравнений в численном виде:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot 7,5 + I_{22} \cdot 2 + I_{33} \cdot 5 = 100; \\ I_{11} \cdot 2 + I_{22} \cdot 12,5 - I_{33} \cdot 10 = 120; \\ I_{11} \cdot 5 - I_{22} \cdot 10 + I_{33} \cdot 25 = 0. \end{cases}$$

2. Рассчитываем главный определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 7,5 & 2 & 5 \\ 2 & 12,5 & -10 \\ 5 & -10 & 25 \end{vmatrix} = 2343,75 - 100 - 100 - 312,5 - 750 - 100 = 981,25.$$

4. Рассчитываем частный определитель

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 100 & 2 & 5 \\ 120 & 12,5 & -10 \\ 0 & -10 & 25 \end{vmatrix} = 31250 - 6000 - 6000 - 10000 = 9250.$$

5. Находим первый контурный ток

$$I_{11} = I_{k1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{9250}{981,25} = 9,43 \text{ A.}$$

6. Аналогичным образом находим другие контурные токи

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 7,5 & 100 & 5 \\ 2 & 120 & -10 \\ 5 & 0 & 25 \end{vmatrix} = 22500 - 5000 - 3000 - 5000 = 9500;$$

$$I_{22} = I_{k2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{9500}{981,25} = 9,68 \text{ A};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 7,5 & 2 & 100 \\ 2 & 12,5 & 120 \\ 5 & -10 & 0 \end{vmatrix} = 1200 - 6250 - 9000 = 1950;$$

$$I_{33} = I_{k3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = 1,987 \text{ A.}$$

7. Находим действительные токи

$$I_1 = I_{11} + I_{33} = 9,43 + 1,987 = 11,42 \text{ A};$$

$$I_2 = I_{22} - I_{33} = 9,68 - 1,987 = 7,7 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{22} + I_{11} = 9,68 + 9,43 = 19,11 \text{ A};$$

$$I_4 = I_{33} = 1,987 \text{ A} \approx 2 \text{ A};$$

$$I_5 = -I_{11} = -9,43 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{22} = 9,68 \text{ A.}$$

Составляем **баланс мощностей**. Уравнение баланса мощностей отражает равенство мощностей, отдаваемых источником энергии и потребляемых приемником, причем, если направления ЭДС и тока в одной ветви – противоположны, то их произведение берётся со знаком “–”

$$-E_1 I_5 + E_2 I_6 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6.$$

8. Находим мощность, отдаваемую источником энергии:

$$-100(-9,43) + 120 \cdot 9,68 = 943 + 1161,6 = 2104,6 \text{ Вт.}$$

9. Находим мощность, потребляемую приемниками:

$$11,42^2 \cdot 5 + 7,7^2 \cdot 10 + 19,11^2 \cdot 2 + 2^2 \cdot 10 + (-9,43)^2 \cdot 0,5 + 9,68^2 \cdot 0,5 = \\ = 652 + 593 + 730,4 + 40 + 44,5 + 46,85 = 2106,7 \text{ Вт;}$$

$$2104,6 \approx 2106,7;$$

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{пр}}$$

ЗАДАЧА 2

Задача посвящена расчету электрической цепи **переменного** однофазного синусоидального тока. Для ее решения применим метод комплексных чисел.

Рассмотрим применение этого метода на примере расчета электрической цепи, изображенной на рис. 2.1.

Дано: $U = 120 \text{ В}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 24 \text{ Ом}$, $R_3 = 15 \text{ Ом}$, $L_1 = 19,1 \text{ мГн}$, $L_2 = 63,5 \text{ мГн}$, $C = 455 \text{ мкФ}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить: токи в ветвях цепи, напряжения на участках цепи, активную и полную мощности. Составить баланс мощностей. Построить векторную диаграмму токов на комплексной плоскости.

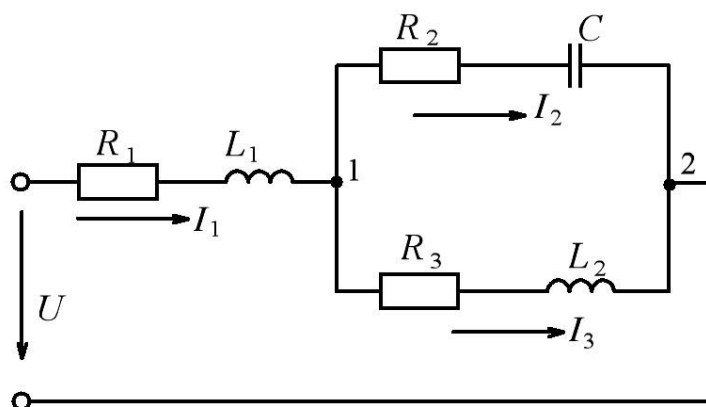


Рис. 2.1

Решение.

1. Выразим сопротивления ветвей в комплексной форме $\underline{Z} = R \pm jX$, тогда:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = R_1 + j \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 10 + j6;$$

$$\underline{Z}_2 = R_1 - j \frac{1}{\omega C_2} = 24 - j \frac{10^6}{2\pi 50 \cdot 455} = 24 - j7;$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 = 15 + j2\pi 50 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3} = 15 + j20.$$

2. Находим полное комплексное сопротивление всей цепи, Ом

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 10 + j6 + \frac{(24 - j7)(15 + j20)}{24 - j7 + 15 + j20} = 10 + j6 + \frac{360 + j480 - j105 + 140}{39 + j13} = \\ &= 10 + j6 + \frac{500 + j375}{39 + j13} = 10 + j6 + \frac{(500 + j375)(39 - j13)}{(39 + j13)(39 - j13)} = 10 + j6 + \\ &+ \frac{19500 - j6500 + j14625 + 4875}{1521 + 169} = 10 + j6 + \frac{24375 + j8125}{1690} = 24,4 + j10,8 \\ Z &= |\underline{Z}| = \sqrt{24,4^2 + 10,8^2} = 26,7 \text{ Ои} \end{aligned}$$

3. Определим ток $\dot{I}_1$ в неразветвленной части цепи, А

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}$$

Выразим заданное напряжение U в комплексной форме. Если начальная фаза напряжения ψ_u не задана, то ее можно принять равной нулю и располагать вектор напряжения так, чтобы он совпадал с положительным направлением действительной оси. Тогда мнимая составляющая комплексного числа будет отсутствовать, т. е. $\dot{U} = 120 \text{ В}$.

$$\dot{I}_1 = \frac{120}{24,4 + j10,8} = \frac{120(24,4 - j10,8)}{(24,4 + j10,8)(24,4 - j10,8)} = \frac{2928 - j1296}{595,36 + 116,64} = 4,11 - j1,82$$

4. Находим напряжение на участке цепи $a - b$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{I}_1 \underline{Z}_1 = (4,11 - j1,82)(10 + j6) = 41,1 + j24,66 - j18,2 + 10,92 = \\ &= 52 + j6,46 \end{aligned}$$

5. Находим напряжение на участке цепи $b-c$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U} - \dot{U}_{ab} = 120 - 52 - j6,46 = 68 - j6,46$$

6. Определим токи $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_2} = \frac{68 - j6,46}{24 - j7} = \frac{(68 - j6,46)(24 + j7)}{(24 - j7)(24 + j7)} = \frac{1667,22 + j320,96}{625} = 2,68 + j0,51$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{68 - j6,46}{15 + j20} = \frac{(68 - j6,46)(15 - j20)}{625} = \frac{890,8 - j1456,9}{625} = 1,42 - j2,33$$

7. Определяем действующие значения токов

$$I_1 = |\dot{I}_1| = \sqrt{4,11^2 + 1,82^2} = \sqrt{20,2} = 4,5 \text{ A};$$

$$I_2 = |\dot{I}_2| = \sqrt{2,68^2 + 0,51^2} = \sqrt{7,44} = 2,73 \text{ A};$$

$$I_3 = |\dot{I}_3| = \sqrt{1,42^2 + 2,33^2} = \sqrt{7,44} = 2,73 \text{ A}.$$

8. Построим векторную диаграмму на комплексной плоскости (рис. 2.2)

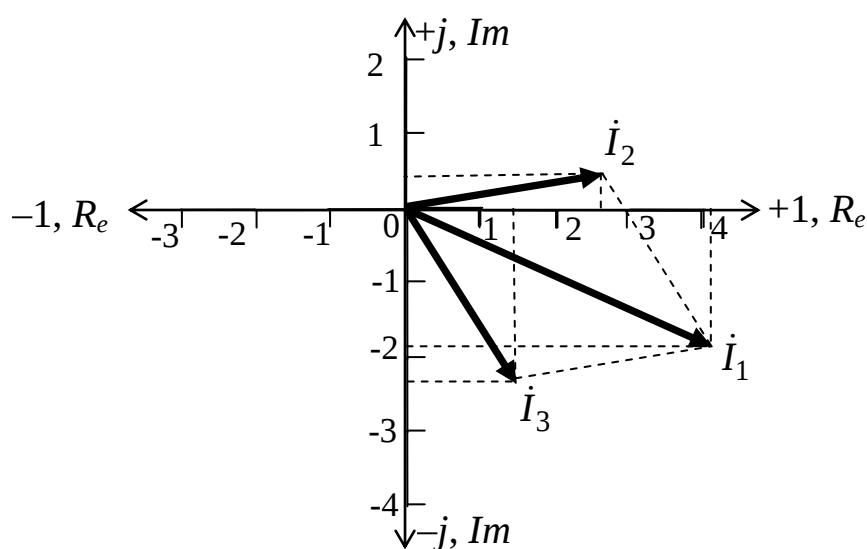


Рис. 2.2

9. Составим баланс мощностей. Активная и реактивная мощности источника должны быть равны сумме активных и реактивных мощностей всех приемников.

Активная и реактивная мощности источника считаются по формуле

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^*,$$

где $\dot{I}^*$ – сопряженное значение комплексного тока, выходящего из источника.

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^* = 120(4,11 + j1,82) = 493,2 + j218,4$$

Отсюда: активная мощность – это вещественная часть комплексной мощности, а реактивная – мнимая часть с учетом знака.

Тогда

$$\begin{aligned} P_{\text{ист}} &= 493,2 \text{ Вт}; \\ Q_{\text{ист}} &= 218,4 \text{ вар}. \end{aligned}$$

Активные и реактивные мощности приемников можно рассчитать по формуле

$$\underline{S}_{\text{п}} = I^2 \cdot \underline{Z} = P \pm jQ.$$

Тогда:

$$\underline{S}_1 = I_1^2 \cdot \underline{Z}_1 = 4,5^2 (10 + j6) = 20,25(10 + j6) = 202,5 + j121,5,$$

$$P_1 = 202,5 \text{ Вт}; Q_1 = 121,5 \text{ вар};$$

$$\underline{S}_2 = I_2^2 \cdot \underline{Z}_2 = 2,73^2 (24 - j7) = 178,9 - j52,17,$$

$$P_2 = 178,9 \text{ Вт}; Q_2 = -52,17 \text{ вар};$$

$$\underline{S}_3 = I_3^2 \cdot \underline{Z}_3 = 2,73^2 (15 + j20) = 111,6 + j148,8,$$

$$P_3 = 111,6 \text{ Вт}; Q_3 = 148,8 \text{ вар};$$

$$P_{\text{пр}} = P_1 + P_2 + P_3 = 202,5 + 178,9 + 111,6 = 493 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{пр}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 121,5 - 52,17 + 148,8 = 218,1 \text{ вар}.$$

10. Определяем показания ваттметра:

$$P = I^2 R,$$

ваттметр показывает активную мощность всей цепи:

$$P = I_1^2 R = 4,5^2 \cdot 24,4 = 494 \text{ Вт}.$$

ЗАДАЧА 3

Задача посвящена расчету трехфазной электрической цепи при соединении фаз симметричного или несимметричного приемника "треугольником" или "звездой".

Рассмотрим расчет таких цепей на следующих примерах.

Пример 1. В трехфазную цепь с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ включен симметричный приемник, соединенный "треугольником", сопротивление каждой фазы которого $\underline{Z} = (10 + j10) \text{ Ом}$ (рис. 3.1).

Найти токи в каждой фазе нагрузки и линии, мощности каждой фазы и всей цепи.

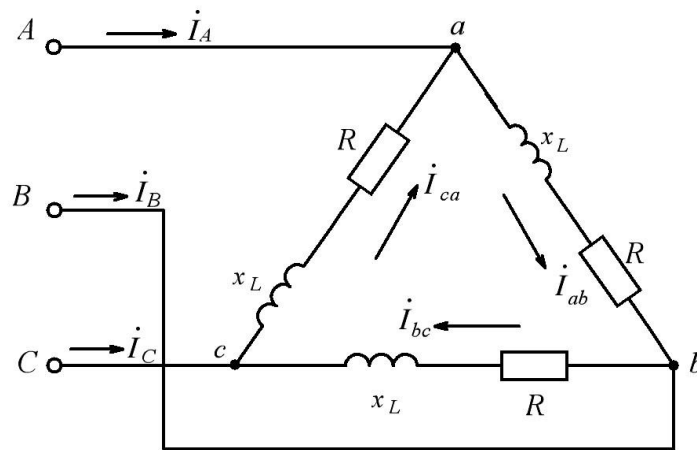


Рис. 3.1

Решение

Расчет токов в трехфазных цепях производится комплексным методом.

1. Записываем векторы линейного напряжения, которые будут равны

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_{ab} = 220 \text{ В}; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_{bc} = 220 \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_{ca} = 220 \cdot e^{j120^\circ}\end{aligned}$$

В алгебраической форме

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BC} &= \dot{U}_{bc} = -110 - j190; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_{ca} = -110 + j190.\end{aligned}$$

2. Определяем фазные токи (рис. 3.1)

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{220}{10 + j10} = 11 - j11;$$

действующее значение тока

$$I_{ab} = \sqrt{11^2 + 11^2} = 15,5 \text{ A}.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bc} &= \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{-110 - j190}{10 + j10} = \frac{(-110 - j190)(10 - j10)}{100 + 100} = \\ &= \frac{-1100 + j1100 - j1900 - 1900}{200} = -15 - j4; \end{aligned}$$

действующее значение тока

$$I_{bc} = 15,5 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ca} &= \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{-110 + j190}{10 + j10} = \frac{(-110 + j190)(10 - j10)}{100 + 100} = \\ &= \frac{-1100 + j1100 + j1900 + 1900}{200} = 4 + j15; \end{aligned}$$

действующее значение тока

$$I_{ca} = 15,5 \text{ A}.$$

3. Определяем линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 11 - j11 - 4 - j15 = 7 - j26;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -15 - j4 - 11 + j11 = -26 + j7;$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 4 + j15 + 15 + j4 = 19 + j19.$$

Действующие значения линейных токов

$$I_A = 26,9 \text{ A}; \quad I_B = 26,9 \text{ A}; \quad I_C = 26,9 \text{ A}.$$

4. Для подсчёта баланса мощностей определяем комплексное значение мощности каждой фазы:

$$\underline{S}_{ab} = \dot{U}_{ab} I_{ab}^* = 220 (11 + j11) = \underbrace{2420}_P + j \underbrace{2420}_Q,$$

где I_{ab}^* – сопряженное значение комплексного тока.

$$P_{ab} = 2420 \text{ Вт};$$

$$Q_{ab} = 2420 \text{ вар.}$$

$$\underline{S}_{bc} = \dot{U}_{bc} I_{bc}^* = (-110 - j190) (-15 + j4) = 2420 + j2420;$$

$$P_{bc} = 2420 \text{ Вт};$$

$$Q_{bc} = 2420 \text{ вар.}$$

$$\underline{S}_{ca} = \dot{U}_{ca} I_{ca}^* = (-110 + j190) (4 - j15) = 2420 + j2420;$$

$$P_{ca} = 2420 \text{ Вт};$$

$$Q_{ca} = 2420 \text{ вар.}$$

5. Определяем активную мощность всей цепи

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 3P_{ab} = 3P_{bc} = 3P_{ca} = 7620 \text{ Вт.}$$

6. Определяем реактивную мощность всей цепи

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = 3Q_{ab} = 3Q_{bc} = 3Q_{ca} = 7620 \text{ вар.}$$

Поскольку имеем симметричный приемник, можно было определить активную и реактивную мощности любой фазы и умножением этой мощности на 3 получить мощность всей цепи.

Пример 2. В четырехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ включен "звездой" приемник (рис. 3.2), активные и индуктивные сопротивления фаз которого соответственно равны:

$$R_a = 3 \text{ Ом}, \quad X_a = 4 \text{ Ом};$$

$$R_b = 3 \text{ Ом}, \quad X_b = 5,2 \text{ Ом};$$

$$R_c = 4 \text{ Ом}, \quad X_c = 3 \text{ Ом.}$$

Определить токи в линейных и нейтральном проводах, а также активные и реактивные мощности фаз и всей цепи.

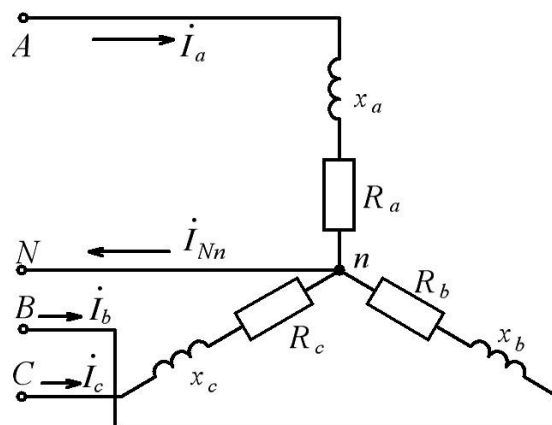


Рис. 3.2

Решение.

Считаем, что вектор фазного напряжения U_a направлен по действительной оси, тогда

$$U_a = \frac{U_{\text{э}}}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = 127e^{-j120^\circ} = -63,5 - j110;$$

$$\dot{U}_c = 127e^{j120^\circ} = -63,5 + j110.$$

1. Записываем комплексные сопротивления каждой фазы

$$\underline{Z}_a = 3 + j4; \quad \underline{Z}_b = 3 + j5,2; \quad \underline{Z}_c = 4 + j3.$$

2. Определяем действующие значения сопротивлений фаз

$$\underline{Z}_a = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_b = \sqrt{3^2 + 5,2^2} = 6 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}.$$

3. Определяем фазные токи, они же будут и линейными

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{127}{3 + j4} = \frac{127(3 - j4)}{9 + 16} = 15,24 - j20,32.$$

Действующее значение тока

$$I_a = \sqrt{15,24^2 + 20,32^2} = 25,4 \text{ А}.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{-63,5 - j110}{3 + j5,2} = \frac{(-63,5 - j110)(3 - j5,2)}{9 + 27} = \\ &= \frac{-190,5 + j330,2 - j330 - 572}{36} = -21,2 + j0,005 \end{aligned}$$

Действующее значение тока

$$I_b = \sqrt{21,2^2 + 0,005^2} = 21,2 \text{ А}.$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{-63,5 + j110}{4 + j3} = 3,04 + j25,22.$$

Действующее значение тока

$$I_c = \sqrt{3,04^2 + 25,22^2} = 25,4 \text{ А}.$$

4. Определяем ток в нейтральном проводе

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Nn} &= \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 15,24 - j20,32 - 21,2 + j0,005 + 3,04 + j25,22 = \\ &= -2,92 + j4,9. \end{aligned}$$

Действующее значение тока

$$I_{Nn} = |\dot{I}_{Nn}| = \sqrt{2,92^2 + 4,9^2} = 5,704 \text{ А}$$

5. Активные и реактивные мощности каждой фазы и всей цепи определяются аналогичным образом, как в примере 1.

Пример 3. В трехфазную цепь с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ включен "звездой" приемник, активное, индуктивное и емкостное сопротивления фаз которого равны: $R = X_L = X_C = 22 \text{ Ом}$ (рис. 3.3).

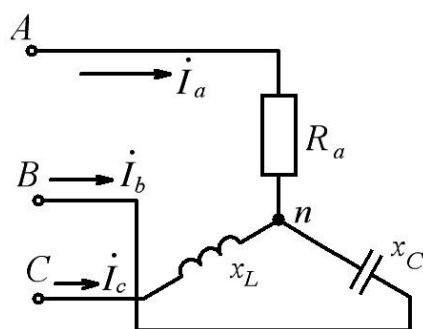


Рис. 3.3

Определить токи в каждой фазе, активные и реактивные мощности фаз и всей цепи.

Решение.

Расчет токов производят комплексным методом.

Комплексное сопротивление каждой фазы

$$\underline{Z}_a = 22; \quad \underline{Z}_b = -j22; \quad \underline{Z}_c = +j22$$

1. Определяем фазные напряжения генератора:

$$\dot{U}_A = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220;$$

$$\dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,5;$$

$$\dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,5.$$

2. Для того чтобы найти фазные напряжения приемника, поскольку нагрузка несимметричная, необходимо найти напряжения между нейтральными точками генератора и приемника

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_B + \underline{Y}_c \dot{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – комплексные значения проводимостей каждой фазы-приемника:

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{22}, \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{-j22}, \quad \underline{Y}_c = \frac{1}{j22}.$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Nn} &= \frac{\frac{1}{22} \cdot 220 + (-110 - j190,5) \cdot \left(\frac{1}{-j22}\right) + (-110 + j190,5) \cdot \left(\frac{1}{j22}\right)}{\frac{1}{22} + \frac{1}{-j22} + \frac{1}{j22}} = \\ &= \frac{10 + (-110 - j190,5)\left(\frac{1}{-j22}\right) + (-110 + j190,5)\left(\frac{1}{j22}\right)}{0,045 + j - j} = \\ &= \frac{10 + 17,318}{0,045} = \frac{27,318}{0,045} = 607,07. \end{aligned}$$

Действующее значение напряжения на нулевом проводе:

$$U_{Nn} = 607,07 \text{ В.}$$

3. Определяем фазные напряжения приемника

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = 220 - 607,07 = -387,07$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = -110 - j190,5 - 607,07 = -717,07 - j190,5$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = -110 + j190,5 - 607,07 = 717,07 + j190,5$$

4. Определяем фазные (линейные) токи

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{387,07}{22} = -17,6.$$

Действующее значение тока

$$I_a = 17,6 \text{ А.}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{-717,07 - j190,5}{-j22} = 8,659 - j32,594.$$

Действующее значение тока

$$I_b = |\dot{I}_b| = \sqrt{8,659^2 + 32,594^2} = 33,7 \text{ А.}$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{-717,07 + j190,5}{j22} = 8,659 + j32,594.$$

Действующее значение тока

$$I_c = |\dot{I}_c| = 33,7 \text{ А.}$$

Активные и реактивные мощности каждой фазы и всей цепи определяются аналогичным образом, как в примере 1.

Все расчеты комплексных чисел (как в задаче № 2, так и в задаче №3) проще всего производить с помощью компьютера, применяя специальную программу «Mathcad», имеющуюся на кафедре в компьютерном классе или на персональном компьютере (требуется предварительно установить эту программу).

ЗАДАЧА 4

Задача посвящена определению параметров электрической цепи методом амперметра, вольтметра и ваттметра (рис.4).

При определении параметров индуктивной катушки методом амперметра, вольтметра и ваттметра расчетные значения определяются по следующим формулам:

активное сопротивление

$$R' = \frac{P}{I^2};$$

полное сопротивление

$$Z' = \frac{U}{I};$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi' = \frac{P}{UI}.$$

Погрешности косвенного измерения:

активного сопротивления

$$\gamma_R = \frac{\Delta R'}{R'} = \frac{\Delta P}{P} + 2 \frac{\Delta I}{I} = \frac{K_w}{100} \frac{U_{kw} \cdot I_{kw}}{P} + 2 \frac{K_{kA}}{100} \cdot \frac{I_{kA}}{I};$$

полного сопротивления

$$\gamma_Z = \frac{\Delta Z'}{Z'} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{K_v}{100} \frac{U_{kv}}{U} + \frac{K_A}{100} \cdot \frac{I_{kA}}{I};$$

коэффициента мощности

$$\gamma_{\cos \varphi} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{K_w}{100} \frac{U_{kw} \cdot I_{kw}}{P} + \frac{K_v}{100} \frac{U_{kv}}{U} + \frac{K_A}{100} \frac{I_{kA}}{I},$$

где K_A , K_v и K_w – классы точности амперметра, вольтметра и ваттметра; I_{kA} , U_{kv} , I_{kw} и U_{kw} – пределы измерения приборов (максимальное значение по шкале, выбранного предела измерения).

Класс точности любого измерительного электромеханического прибора определяется его приведенной погрешностью, которая вычисляется по формуле

$$\gamma_R = \frac{\Delta I}{I_{kA}} 100 \%; \quad \gamma_U = \frac{\Delta U}{U_{kv}} 100 \%; \quad \gamma_P = \frac{\Delta P}{P_{kw}} 100 \%,$$

где $P_{kw} = U_{kw} \cdot I_{kw}$ (U_{kw} и I_{kw} – выбранные пределы по шкале ваттметра); Δ – абсолютная погрешность прибора, т. е. разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины.

Действительные значения рассчитываются по следующим формулам:

активное сопротивление

$$R = R'(1 \pm \gamma_R);$$

полное сопротивление

$$Z = Z'(1 \pm \gamma_Z);$$

коэффициент мощности $\cos$

$$\varphi = \cos \varphi' (1 \pm \gamma_{\cos \varphi}).$$

Пример расчета

Дано:

$$I = 2 \text{ A}; K_A = 1; I_{kA} = 5 \text{ A};$$

$$U = 125 \text{ В}; K_V = 1; U_{kV} = 150 \text{ В};$$

$$P = 180 \text{ Вт}; K_w = 1; I_{kw} = 2,5 \text{ A}; U_{kw} = 300 \text{ В}.$$

Расчет:

Параметры индуктивной катушки:

активное сопротивление, Ом

$$R' = \frac{P}{I^2} = \frac{180}{2^2} = 45;$$

полное сопротивление, Ом

$$Z' = \frac{U}{I} = \frac{125}{2} = 62,5;$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi' = \frac{P}{UI} = \frac{180}{125 \cdot 2} = 0,72.$$

Погрешности косвенного измерения

активного сопротивления

$$\gamma_R = \frac{K_V}{100} \frac{U_{kV}}{125} + \frac{K_A}{100} \frac{I_{kA}}{I} = \frac{1}{100} \frac{300 \cdot 2,5}{180} + 2 \frac{1}{100} \frac{5}{2} = 0,092;$$

полного сопротивления

$$\gamma_Z = \frac{\Delta Z'}{Z'} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{100} \frac{150}{125} + \frac{1}{100} \frac{5}{2} = 0,037;$$

коэффициента мощности

$$\gamma_{\cos \varphi} = \frac{K_w}{100} \frac{U_{kw} \cdot I_{kw}}{P} + \frac{K_v}{100} \frac{U_{kv}}{U} + \frac{K_A}{100} \frac{I_{kA}}{I} =$$
$$= \frac{1}{100} \frac{300 \cdot 2,5}{180} + \frac{1}{100} \frac{150}{125} + \frac{1}{100} \frac{5}{2} = 0,078.$$

Действительные значения:

активного сопротивления, Ом

$$R = R' (1 \pm \gamma_R) = 45 (1 \pm 0,092) = 45 \pm 4,12;$$

полного сопротивления, Ом

$$Z = Z' (1 \pm \gamma_Z) = 62,5 (1 \pm 0,037) = 62,5 \pm 2,31;$$

коэффициента мощности

$$\cos \varphi = \cos \varphi' (1 \pm \gamma_{\cos \varphi}) = 0,72 (1 \pm 0,078) = 0,72 \pm 0,056.$$

ЗАДАЧА 5

Задача посвящена расчету основных характеристик однофазного трансформатора на максимальный коэффициент полезного действия при коэффициенте нагрузки ($K_{\text{нл}} = 0,7$) и заданных конфигурации магнитопровода и типе электротехнической стали.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ варианта	$S_{\text{н}}$, ВА	U_1 , В	U_2 , В	$\cos \varphi_2$	$l_{\text{ср}}$, м	$\text{tg } \varphi_k$	Тип стали
51	500	220	36	0,7	0,4	2,5	1511

Решение

1. Определяем номинальные токи обмоток:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{500}{200} = 2,27 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{S_1}{U_2} = \frac{500}{36} = 13,9 \text{ A}.$$

2. В соответствии с кривой намагничивания стали 1511, приведенной в условии задачи, вычисляем величину индукции B_m в сердечнике

$$B_m = 1,35 \text{ Тл},$$

что соответствует напряженности магнитного поля $H = 600 \text{ А/м}$ и удельным потерям в стали $P_{\text{уд}} = 2,1 \text{ Вт/кг}$.

3. Примем допустимую величину тока холостого хода

$$I_{10} = 0,1 \cdot I_{1\text{н}} = 0,1 \cdot 2,27 = 0,23 \text{ A}.$$

4. На основании закона полного тока определяем число витков первичной обмотки

$$N_1 I_{10} = I_{\text{ср}} H; \quad N_1 = \frac{H l_{\text{ср}}}{I_{10}},$$

где N_1 – число витков

$$N_1 = \frac{6000 \cdot 0,4}{0,23} = 1043.$$

5. Определяем коэффициент трансформации:

$$K = U_1/U_2 = N_1/N_2;$$

$$K = 220/36 = 6,1,$$

6. Определяем число витков вторичной обмотки трансформатора

$$N_2 = \frac{N_1}{K} = \frac{1043}{6,1} = 171.$$

7. Определяем активное сечение магнитопровода q , см².

Поскольку $U = 4,44 \Phi f N$, а $\Phi = Bq$, тогда

$$q = \frac{U \cdot 10^4}{4,44 B_m f N_1} = \frac{220 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 1,35 \cdot 50 \cdot 1043} = 7,04.$$

8. Рассчитываем сечение сердечника q_c с учетом коэффициента заполнения пакета

$$q_c = \frac{N_1}{K_{ст}} = \frac{7}{0,92} = 7,65 \text{ см}^2.$$

9. Определяем объем (V_c) и массу (G_c) сердечника

$$V_c = l_{cp} q_c = 0,4 \cdot 7,65 \cdot 10^{-4} = 3,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$G_c = V_c \gamma_{ст} = 3,06 \cdot 10^{-4} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 2,39 \text{ кг}.$$

Проверка

Сердечник рассчитан верно, если относительный вес g на каждые 100 Вт номинальной мощности составляет не более

$$-g = 0,4 \dots 0,5 \text{ кг};$$

$$G_c = g \frac{S_H}{100} = 0,45 \frac{500}{100} = 2,25 \text{ кг},$$

т. е. сердечник рассчитан верно.

10. Определяем мощность потерь в стали и в обмотках (потери в меди) трансформатора

$$P_{ст} = P_{уд} G_c = 2,1 \cdot 2,39 = 5 \text{ Вт};$$

$$P_m = 2P_{ст} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ Вт}.$$

11. Определяем эквивалентное активное сопротивление обмоток

$$R_k = \frac{P_m}{I_{1H}^2} = \frac{10}{2,27^2} = 1,94 \text{ Ом}.$$

12. Определяем напряжение короткого замыкания

$$U_{к.з} = \frac{U_{ка}}{\cos \varphi_k} = \frac{I_{1н} R_k}{\cos \varphi_k} = 2,27 \frac{1,94}{0,375} = 11,9 \text{ В},$$

где $\cos \varphi_k = 0,37$; $\varphi_k = 68,2^\circ$.

В процентном отношении это составит

$$U_{к.з} \% = \frac{U_{кз} \cdot 100}{U_{1н}} = 11,9 \frac{100}{220} = 5,4 \ \%.$$

Эта величина должна удовлетворять соотношению

$$U_{к.з} \% \leq 8 \ \%.$$

13. Построить внешнюю характеристику трансформатора

$U_2 = f(K_{нг})$ и зависимость КПД $\eta = f(K_{нг})$

$$\Delta U_2 = \frac{K_{нг}}{K} (U_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin \varphi_2),$$

где $U_{ка}$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{ка} = I_{1н} R_k = 2,27 \cdot 1,94 = 4,4 \text{ В};$$

$U_{кр}$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{кр} = U_{ка} \operatorname{tg} \varphi_k = I_{1н} R_k \operatorname{tg} \varphi_k = 2,27 \cdot 1,94 \cdot 2,5 = 11 \text{ В};$$

$$U_2 = U_{2н} - \Delta U_2.$$

Задаваясь значениями коэффициента нагрузки $K_{нг} = 0 \dots 1,3$, получим уменьшение вторичного напряжения ΔU_2 . Результаты расчета сведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

$K_{нг}$	0	0,25	0,5	0,7	1	1,3
$\Delta U_2, \text{ В}$	0	0,44	0,89	1,25	1,78	2,34
$U_2, \text{ В}$	36	35,56	35,11	34,75	34,22	33,66

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{K_{\text{нг}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{K_{\text{нг}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + K_{\text{нг}}^2 P_{\text{м}} + P_{\text{ст}}},$$

где $K_{\text{нг}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2 = P_2$ – полезная мощность; $K_{\text{нг}}^2 P_{\text{м}}$ – потери в меди обмоток трансформатора.

Результаты расчета сведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

$K_{\text{нг}}$	0	0,5	0,6	0,71	0,8	1	1,3
$K_{\text{нг}}^2 P_{\text{м}}$	0	2,5	3,6	5	6,4	10	16,9
$K_{\text{нг}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2$	0	175	210	245,5	280	350	455
η	0	0,958	0,96	0,9613	0,96	0,958	0,954

На рис. 5 приведены графики соответствующих зависимостей

$$U_2 = f(K_{\text{нг}}) \quad \text{и} \quad \eta = f(K_{\text{нг}})$$

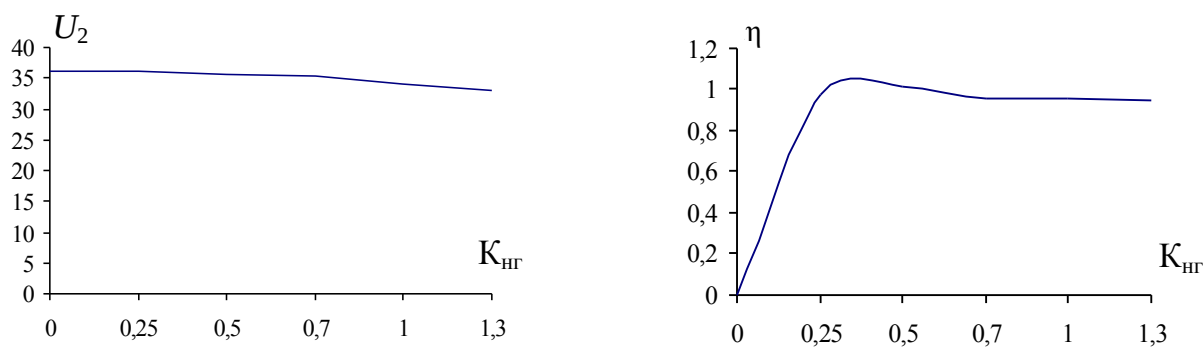


Рис. 5

ЗАДАЧА 6

Выпрямитель – это электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное.

Основными элементами выпрямителя являются трансформатор и вентили (диоды), с помощью которых обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки.

Режим работы и параметры отдельных элементов выпрямителя согласовываются с заданными условиями работы потребителя постоянного тока. Поэтому основная задача сводится к определению параметров элементов теоретической модели выпрямителя и последующему подбору реальных элементов по полученным параметрам.

Пример 1. Исходные данные:

$$U_{н.ср.} = 8 \text{ В}, I_{н.ср.} = 5 \text{ А}, U_1 = 220 \text{ В}, f = 50 \text{ Гц}.$$

1. В соответствии с вариантом вычерчиваем схему выпрямителя (рис. 6.1).

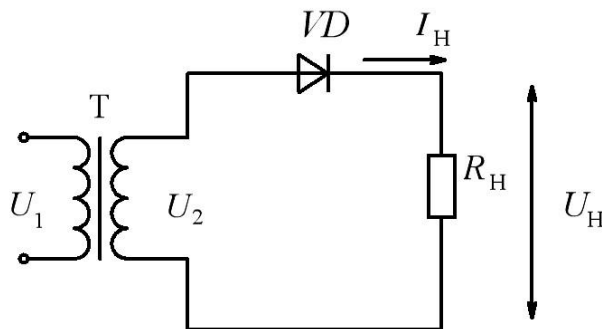


Рис. 6.1

2. Из табл. 6.1 находим параметры, необходимые для выбора диода: прямой ток через диод $I_{пр}$ и обратное напряжение $U_{обр}$

$$I_{пр} = 1 \cdot I_{н.ср.} = 1 \cdot 5 = 5 \text{ А},$$

$$U_{обр} = 3,14 \cdot U_{н.ср} = 3,14 \cdot 8 = 25,12 \text{ В}.$$

3. Исходя из значений $I_{пр}$ и $U_{обр}$ из табл. 6.2 диодов производим выбор диода типа 2Д251А. Выписываем параметры выбранного диода:

- максимальный прямой ток $I_{пр\max} = 10\text{А}$;
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\max} = 50\text{ В}$;
- прямое падение напряжения на диоде $U_{пр} = 1\text{В}$.

4. Определяем активную мощность на нагрузке

$$P_{\text{н}} = I_{\text{н. ср}} U_{\text{н. ср}} = 5 \cdot 8 = 40 \text{ Вт.}$$

5. Определяем эквивалентное сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н}} = U_{\text{н. ср}} / I_{\text{н. ср}} = 8 / 5 = 1,6 \text{ Ом.}$$

6. Определяем полную мощность трансформатора (табл. 6.1)

$$S_{\text{тр}} = 3,49 \cdot P_{\text{н}} = 3,49 \cdot 40 = 139,6 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

7. По значениям величин из таблицы 6.1 определяем параметры трансформатора:

- напряжение на вторичной обмотке

$$U_2 = 2,22 \cdot U_{\text{н. ср}} = 2,22 \cdot 8 = 17,76 \text{ В,}$$

- ток первичной обмотки

$$I_1 = 1,21 \cdot I_{\text{н. ср}} = 1,21 \cdot 5 = 6,05 \text{ А.}$$

8. Рассчитываем коэффициент трансформации трансформатора по напряжению

$$K = U_1 / U_2 = 220 / 17,76 = 12,39.$$

9. Определяем коэффициент полезного действия выпрямителя

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{д}}} 100 \% = \frac{40}{40 + 2,5 + 10} 100 \% = 76 \%,$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери в трансформаторе, определяющиеся по выражению

$$\Delta P_{\text{тр}} = S_{\text{тр}} \cdot \cos \varphi (1 - \eta_{\text{тр}}) = 139,6 \cdot 0,9 \cdot (1 - 0,98) = 2,5 \text{ Вт,}$$

в котором значение к.п.д. трансформатора ($\eta_{\text{тр}}$) при номинальной нагрузке выбирается в пределах 0,97...0,99, значение коэффициента мощности трансформатора ($\cos \varphi$) выбирается в пределах 0,87...0,95; $\Delta P_{\text{д}}$ – потери мощности в диодах, равные

$$\Delta P_{\text{д}} = I_{\text{пр max}} U_{\text{пр max}} N = 10 \cdot 1 \cdot 1 = 10 \text{ Вт},$$

где N – общее число диодов в схеме.

Пример 2. Исходные данные:

$$U_{\text{н.ср.}} = 8 \text{ В}, I_{\text{н.ср.}} = 5 \text{ А}, U_1 = 220 \text{ В}, f = 50 \text{ Гц}.$$

1. В соответствии с вариантом вычерчиваем схему выпрямителя (рис. 6.2).

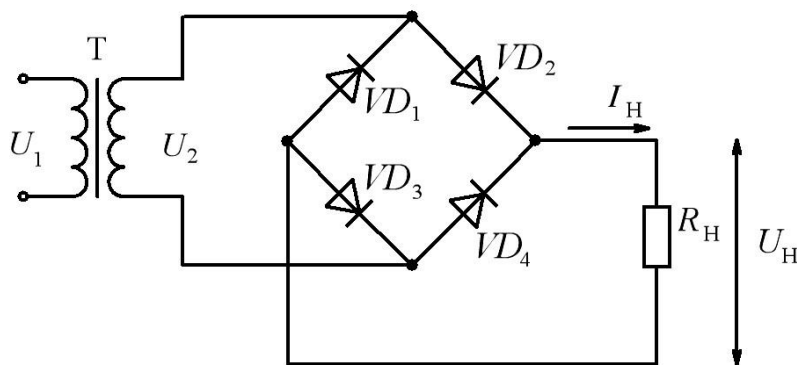


Рис. 6.2

2. Из табл. 6.1 находим параметры, необходимые для выбора диода:

– прямой ток через диод $I_{\text{пр}}$

$$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{н.ср.}} = 1 \cdot 5 = 2,5 \text{ А};$$

– обратное напряжение $U_{\text{обр}}$

$$U_{\text{обр}} = 1,57 \cdot U_{\text{н.ср.}} = 3,14 \cdot 8 = 12,56 \text{ В}.$$

3. Исходя из значений $I_{\text{пр}}$ и $U_{\text{обр}}$ по табл. 6.2 производим выбор диода типа 2Д222АС. Выписываем параметры выбранного диода:

– максимальный прямой ток $I_{\text{пр max}} = 3 \text{ А};$

- максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр max}} = 20 \text{ В}$;
- прямое падение напряжения на диоде $U_{\text{пр}} = 0,6 \text{ В}$.

4. Определяем активную мощность на нагрузке

$$P_{\text{н}} = I_{\text{н.ср}} U_{\text{н.ср}} = 5 \cdot 8 = 40 \text{ Вт.}$$

5. Определяем эквивалентное сопротивление нагрузки:

$$R_{\text{н}} = U_{\text{н.ср}} / I_{\text{н.ср}} = 8 / 5 = 1,6 \text{ Ом.}$$

6. Определяем полную мощность трансформатора (табл. 6.1)

$$S_{\text{тр}} = 1,23 P_{\text{н}} = 1,23 \cdot 40 = 49,2 \text{ ВА.}$$

7. По значениям вычисленных величин из табл. 6.1 определяем параметры трансформатора:

- напряжение на вторичной обмотке

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{\text{н.ср}} = 1,11 \cdot 8 = 8,88 \text{ В};$$

- ток первичной обмотки

$$I_1 = 1,11 I_{\text{н.ср}} = 1,11 \cdot 5 = 5,55 \text{ А.}$$

8. Рассчитаем коэффициент трансформации трансформатора по напряжению

$$K = U_1 / U_2 = 220 / 8,88 = 24,77.$$

9. Определяем коэффициент полезного действия выпрямителя:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{д}}} 100 \% = \frac{40}{40 + 0,89 + 7,2} 100 \% = 83 \%,$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери в трансформаторе, вычисляемые по выражению

$$\Delta P_{\text{тр}} = S_{\text{тр}} \cos \varphi (1 - \eta_{\text{тр}}) = 49,2 \cdot 0,9(1 - 0,98) = 0,89 \text{ Вт},$$

в котором значение к.п.д. трансформатора ($\eta_{\text{тр}}$) при номинальной нагрузке выбирается в пределах 0,97...0,99, а значение коэффициента мощности трансформатора ($\cos \varphi$) выбирается в пределах 0,87...0,95; $\Delta P_{\text{д}}$ – потери мощности в диодах

$$\Delta P_{\text{д}} = I_{\text{пр max}} U_{\text{пр max}} N = 3 \cdot 0,6 \cdot 4 = 7,2 \text{ Вт},$$

где N – общее число диодов в схеме.

Таблица 6.1

Тип схемы выпрямителя	Параметры				
	$\frac{U_2}{U_{н.ср.}}$	$\frac{U_{обр.}}{U_{н.ср.}}$	$\frac{I_{пр.}}{I_{н.ср.}}$	$\frac{I_1}{I_{н.ср.}}$	Мощность трансформатора $\frac{S_{тр.}}{P_{н.}}$
Однофазная, од- нополупериодный	2,22	3,14	1,0	1,21	3,49
Однофазная, двух- полупериодный (мостовой)	1,11	1,57	0,5	1,11	1,23

Таблица 6.2

Справочные данные по диодам (фрагмент каталога)

Тип диода	$I_{пр\ max},$ А	$I_{обр\ max},$ мкА	$U_{обр\ max},$ В	$U_{пр\ max},$ В	$f,$ кГц
2Д213А–	10	200	200	1,0	100
-2Д213Г6	10	200	100	1,2	100
2Д222АС–	3	2000	20	0,6	200
-2Д222ЕС	3	2000	40	0,7	200
2Д231А	10	50	150	1,0	200
2Д231Б	10	50	200	1,0	200
2Д231В	10	50	150	1,0	200
2Д231Г	10	50	200	1,0	200
2Д239А	20	20	100	1,4	500
2Д239Б	20	20	250	1,4	500
2Д239В	20	20	200	1,4	500
КД244А	10	100	100	1,3	200
КД244Б	10	100	100	1,3	200
КД244В	10	100	200	1,3	200
КД244Г	10	100	200	1,3	200
2Д245А	10	100	400	1,4	200
2Д245Б	10	100	200	1,4	200
2Д245В	10	100	100	1,4	200
2Д250А	10	50	125	1,4	100
2Д251А	10	50	50	1,0	200
2Д251Б	10	50	70	1,0	200

Тип диода	$I_{\text{пр max}},$ А	$I_{\text{обр max}},$ мкА	$U_{\text{обр max}},$ В	$U_{\text{пр max}},$ В	$f,$ кГц
2Д251В	10	50	100	1,0	200
2Д251Д	10	50	70	1,0	200
2Д251Е	10	50	100	1,0	200
2Д252А	30	2000	80	0,95	200
2Д252Б	30	2000	100	0,95	200
2Д252В	20	2000	120	0,95	200
КД2989В	20	200	200	1,4	100
КД2989В1	20	200	200	1,4	100
2Д2990В	20	100	200	1,4	200

ЗАДАЧА 7

Задача посвящена определению мощности, необходимой для привода механизма, работающего в длительном режиме с переменной нагрузкой, и выбору асинхронного двигателя.

Исходные данные.

Моменты нагрузок двигателя соответствующих участков нагрузочной диаграммы

$$M_1 = 80 \text{ Нм}; M_2 = 50 \text{ Нм}; M_3 = 30 \text{ Нм}; M_4 = 60 \text{ Нм}.$$

Время работы с заданными моментами

$$t_1 = 10 \text{ мин}; t_2 = 10 \text{ мин}; t_3 = 4 \text{ мин}; t_4 = 8 \text{ мин}.$$

Частота вращения рабочего механизма

$$n_{\text{сн}} = 280 \text{ об/мин}.$$

1. При определении мощности двигателя для длительной работы с переменной нагрузкой воспользуемся методом эквивалентного момента

$$M_{\text{с.экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}.$$

В данном случае

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{80^2 \cdot 10 + 50^2 \cdot 10 + 30^2 \cdot 4 + 60^2 \cdot 8}{10 + 10 + 4 + 8}} = 61,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. Строим нагрузочную диаграмму (рис. 7.1)

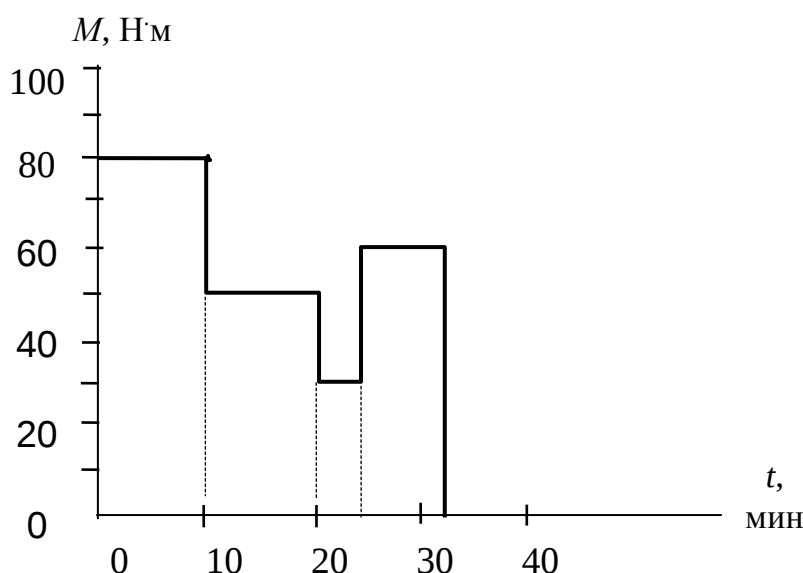


Рис 7

3. Определяем расчетную мощность двигателя при номинальной частоте вращения

$$P_c = \frac{M_{\text{с.экв}} n_{\text{сн}}}{9550} = 61,6 \cdot 280/9550 = 1,8 \text{ кВт}.$$

4. Выбираем из табл. 7.1 двигатель, исходя из условия $P_{\text{дн}} \geq P_c$; кроме того, желательно, чтобы заданная в условии задачи частота вращения рабочего механизма как можно больше приближалась к частоте вращения выбранного двигателя.

Выбранный двигатель 5АМ112МА8 имеет следующие паспортные характеристики: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт}$; номинальная частота вращения $n_{\text{дн}} = 710 \text{ об/мин}$; коэффициент полезного действия $\eta = 79 \%$; коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,7$; «сервис-фактор» — 1,15 — параметр, характеризующий допустимую перегрузку двигателя (в данном примере — 15 %), отношение максимального мо-

мента к номинальному ($K_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 2,5$), отношение пускового момента к номинальному ($K_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 2,0$).

5. Так как частота вращения выбранного двигателя не совпадает с номинальной частотой вращения рабочего механизма, необходимо выбрать понижающий редуктор.

Коэффициент передачи редуктора

$$\frac{n_{\text{дн}}}{n_{\text{сн}}} = \frac{710}{280} = 2,53.$$

По табл. 7.2 производим выбор редуктора со стандартным значением передаточного числа $i_{\text{ст}} = 2,5$.

Определяем уточненное значение частоты вращения механизма

$$n_{\text{сн}} = \frac{n_{\text{дн}}}{i_{\text{ст}}} = \frac{710}{2,5} = 284 \text{ об/мин.}$$

6. Определяем номинальный вращающий момент двигателя

$$M_{\text{дн}} = \frac{P_{\text{дн}}}{0,1n_{\text{дн}}} = \frac{2,2 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 710} = 30,9 \text{ Нм.}$$

7. Производим расчет номинального момента двигателя, приведенного к нагрузке ($M'_{\text{дн}}$).

$$M'_{\text{дн}} = M_{\text{дн}} i_{\text{ст}} = 30,9 \cdot 2,5 = 77,25 \text{ Нм.}$$

8. Производим проверку выбранного двигателя по перегрузочной способности.

Так как из нагрузочной диаграммы данной задачи видно, что максимальный момент ($M_1 = M_{\text{с max}} = 80 \text{ Нм}$) соответствует пусковому, то проверку делаем по коэффициенту $K_{\text{п}}$ ($K_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$). Учитывая этот коэффициент, определяем пусковой момент двигателя

$$M_{\text{п}} = 30,9 \cdot 2 = 61,8 \text{ Нм.}$$

Проверка производится по соотношению:

$$0,81 \cdot M_{\Pi} \cdot i_{\text{ст}} \geq M'_{\Pi} = 0,81 \cdot 61,8 \cdot 2,5 = 125,145 \text{ Нм},$$

где 0,81 – поправочный коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения сети на 10 %; $i_{\text{ст}}$ – стандартный коэффициент выбранного редуктора; M'_{Π} – значение наибольшего момента из нагрузочной диаграммы.

$$125,145 \text{ Нм} > 80 \text{ Нм}.$$

Двигатель подобран правильно.

Если в нагрузочной диаграмме **максимальный** момент не является **пусковым**, то проверку следует производить аналогично, но не по пусковому, а по **максимальному** моменту ($K_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$).

Таблица 7.1

**Справочные данные по асинхронным двигателям
(фрагмент каталога)**

Тип двигателя	$P_{\text{ном}},$ кВт	При номинальной нагрузке		$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	Сервис-фактор
		$n_{\text{ном}},$ об/мин	$\eta, \%$					
5AM112MA8	2,2	710	79	2,5	2,0	0,7	4,8	1,15
AMPM132S8	4	715	82	2,5	2,0	0,7	4,8	1,15
5A160S8	7,5	725	86	2,2	1,6	0,72	5,3	1,15
АИР180М8	15	730	88	2,2	1,6	0,78	5,3	1,15
5A200L8	22	735	90	2,6	2,0	0,77	6,2	1,1
5AM250S8	37	740	92	2,6	1,3	0,73	6,5	1,15
5AM250M8	45	740	93	2,6	1,8	0,75	6,8	1,15
5AM280S8e	55	740	93,6	2,0	1,9	0,83	5,9	1,15
5AM280M8e	75	740	94,0	2,1	2,0	0,82	6,0	1,15
5AM315S8e	90	740	94,5	2,1	1,4	0,85	6,0	1,15
5AM315MA8e	110	740	94,5	2,1	1,4	0,86	5,9	1,15
5AM315MB8e	132	740	94,5	2,3	1,7	0,84	6,5	1,1

Окончание табл. 7.1

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	При номинальной нагрузке		$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\cos \varphi_n$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	Сервис-фактор
		$n_{\text{ном}}$, об/мин	η , %					
5A80MA6	1,1	930	71	2,3	2,0	0,69	4,5	1,15
5AM112MA6	3	950	81,0	2,6	2,3	0,8	5,5	1,15
AMPM132S65	5,5	960	84,5	2,5	2,0	0,8	5,8	1,15
5A160S6	11	970	87,0	2,5	1,9	0,82	6,5	1,15
АИР180М6	18,5	980	89,5	2,7	1,9	0,84	6,5	1,15
5A200M6	22	975	90,5	2,2	2,2	0,83	6,0	1,15
5A200L6	30	975	90,5	2,2	2,4	0,84	6,0	1,1
5AM250S6	45	985	93	2,2	2,2	0,84	6,2	1,15
5AM250M6	55	985	92,5	2,0	2,0	0,84	6,2	1,15
5AM280S6e	75	990	94,5	2,0	1,9	0,85	6,2	1,15
5AM280M6e	90	990	94,5	2,2	1,9	0,85	6,2	1,15
5AM315S6e	110	990	94,8	2,6	1,8	0,88	6,9	1,15
5AM315MAe	132	990	95,0	2,4	1,6	0,9	6,6	1,15
5AM315MB6e	160	990	95,1	2,4	2,0	0,89	7,5	1,0

Таблица 7.2

**Передаточные числа зубчатых цилиндрических и конических передач
(по ГОСТ 2185-66, ГОСТ 12289-56) и двухступенчатых редукторов
(по ГОСТ 2185-66)**

1,0	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
2,0	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3,0	3,15	3,35	3,55	3,75
4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,3	5,6	6,0	6,3	6,7	7,1	7,5
8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,6	11,2	11,8	12,5	14,0	16,0	18,0
20,0	22,4	25,0	28	31,5	35,5	40	45	50	56	63	71

ЗАДАЧА 8

Задача посвящена вопросу снижения уровня реактивной мощности в электрических сетях (повышение коэффициента мощности – $\cos \varphi$).

Реактивная мощность, потребляемая асинхронным двигателем (АД) при степени загрузки $K_{нг}$, определяется зависимостью

$$Q_{ад} = Q_{х.х} + (Q_n - Q_{х.х}) K_{нг}^2,$$

где $Q_{х.х}$ – реактивная мощность холостого хода АД равная

$$Q_{х.х} = \frac{P_n m}{\eta},$$

где m – расчетный коэффициент, зависящий от номинального коэффициента мощности $\cos \varphi_n$ (рис. 8.1); Q_n – реактивная мощность АД при номинальной нагрузке

$$Q_n = \frac{P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta}.$$

Суммарная реактивная мощность, подлежащая компенсации при работе двух АД,

$$Q_k = Q_{АД1} + Q_{АД2}.$$

Величина емкости C , мкФ батареи конденсаторов, включаемых в одну фазу, при условии соединения их в треугольник равна:

$$C = \frac{Q_{сф} \cdot 10^6}{314 U_{\phi}^2},$$

так как реактивная (емкостная) мощность одной фазы вычисляется по формуле (подобно однофазному переменному току) – $Q_c = U_{\phi}^2 b_c = U_{\phi}^2 2\pi f C = U_{\phi}^2 314 C$. Поскольку в условии задачи требуется подсчитать величину емкости батареи конденсаторов, включенных в одну фазу, при условии **полной компенсации** реактивной мощности (Q_k) при работе двух двигателей, подключенных к сети трехфазного тока ($Q_{сф} = \frac{Q_k}{3}$), окончательная расчетная формула имеет вид: $C = \frac{Q_k \cdot 10^6}{942 U_{\phi}^2}$

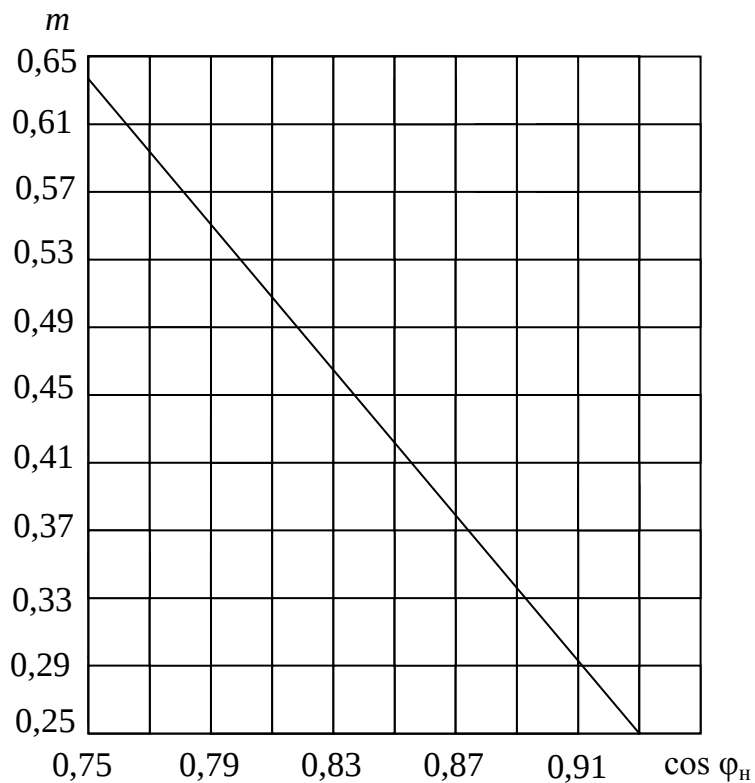


Рис. 8

Пример. Исходные данные представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

U_d , В	$P_{н1}$, кВт	$K_{нг1}$	$\cos \varphi_{н1}$	$\eta_{н1}$	$P_{н2}$, кВт	$K_{нг2}$	$\cos \varphi_{н2}$	$\eta_{н2}$
380	18,5	0,6	0,88	0,9	30	0,8	0,89	0,91

Решение

1. Определяем номинальную реактивную мощность, потребляемую АД₁

$$Q_n = \frac{P_{н1} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{н1}}{\eta_{н1}} = \frac{18,5 \cdot 0,53}{0,9} = 11,1 \text{ квар.}$$

2. Определяем реактивную мощность АД₁ при коэффициенте нагрузки $K_{нг1} = 0,6$

$$Q_{0,6} = Q_{x.x1} + (Q_{н1} - Q_{x.x1}) K_{нг}^2,$$

где $Q_{x.x1} = \frac{P_{н1} \cdot m}{\eta_{н1}} = \frac{18,5 \cdot 0,35}{0,9} = 7,19$ квар; $m = 0,35$ – находится из графика (рис. 8.1).

$$Q_{AD1} = Q_{0,6} = Q_{x.x1} + (Q_{н1} - Q_{x.x1}) K_{нг1}^2 = \\ = 7,19 + (11,1 - 7,19) 0,6^2 = 8,6 \text{ квар.}$$

3. Определяем номинальную реактивную мощность потребляемую АД₂

$$Q_{н1} = \frac{P_{н2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{н2}}{\eta_{н2}} = (30/0,91) 0,51 = 16,89 \text{ квар.}$$

4. Определяем реактивную мощность АД₂ при коэффициенте нагрузки $K_{нг2} = 0,8$ (см. график рис. 8.1)

$$Q_{AD2} = Q_{x.x2} + (Q_{н2} - Q_{x.x2}) K_{нг2}^2,$$

где $Q_{x.x2} = \frac{P_{н2} \cdot m}{\eta_{н2}} = 30/0,91 \cdot 0,35 = 11,54;$

$$Q_{AD2} = Q_{0,8} = 11,54 + (16,89 - 11,54) 0,64 = 14,96 \text{ квар}$$

5. Определяем **общую** реактивную мощность, подлежащую компенсации,

$$Q_k = Q_{AD1} + Q_{AD2} = 8,6 + 14,96 = 23,56 \text{ квар}$$

6. Определяем величину емкости батареи конденсаторов, включенных в одну фазу при $U_{л} = 380$ В

$$c_{\phi} = \frac{Q_k \cdot 10^6}{942 U_{\phi}^2} = 23,56 \cdot 10^6 / 942 \cdot 380^2 = 173 \text{ мкФ.}$$

7. Определяем реальную активную мощность двух АД

$$P = \frac{P_{н1}}{\eta_{н1}} K_{нг1} + \frac{P_{н2}}{\eta_{н2}} K_{нг2} = (18,5/0,9) 0,6 + (30/0,91) 0,8 = \\ = 12,33 + 26,37 = 38,7 \text{ кВт.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Касаткин А.С., Немцов М.В.** Электротехника. – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.
2. **Афанасьева Н.А., Булат Л. П.** Электротехника и электроника: Учеб. пособие. – СПб., 2006. – 177 с.
3. **Иванов И.И., Соловьев Г.И.** Электротехника. – СПб., М., Краснодар, 2008. – 496 с.
4. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для вузов. Под ред. **В.В. Кононенко.** – 2008. – 778 с.
5. **Миловзоров О.В., Панков И.Г.** Электроника. – М.: Высш. шк., 2006. – 287 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧА 1	3
ЗАДАЧА 2	12
ЗАДАЧА 3	16
ЗАДАЧА 4	23
ЗАДАЧА 5	26
ЗАДАЧА 6	31
ЗАДАЧА 7	36
ЗАДАЧА 8	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	44

Афанасьева Наталия Александровна
Батяев Анатолий Алексеевич
Ерофеева Ирина Александровна

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Примеры расчета
контрольных заданий для студентов
всех специальностей
факультета заочного обучения
и экстерната

Часть 2

Второе издание,
переработанное и дополненное

Редактор

Т.Г. Смирнова

Корректор

Н.И. Михайлова

Компьютерная верстка

Н.В. Гуральник

Подписано в печать 28.12.2008. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,4

Тираж 200 экз. Заказ № С 247

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

ИИК СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9