

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

Методические указания
к практическим занятиям по курсу
«Электротехника и электроника»
для преподавателей и студентов
очной и заочной форм обучения

Санкт-Петербург
2009

УДК 621.3

Афанасьева Н.А., Ерофеева И.А. Электротехника и электроника: Метод. указания к практическим занятиям по курсу «Электротехника и электроника» для преподавателей и студентов очной и заочной форм обучения. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 53 с.

Даны рекомендации преподавателям и студентам к практическим занятиям. Приводятся подробные пояснения и расчеты к решению задач восьми тем основных разделов курса.

Рецензент

Канд. техн. наук, доц. Ю.А. Рахманов

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный
университет низкотемпературных
и пищевых технологий, 2009

ВВЕДЕНИЕ

На практических занятиях студенты под руководством преподавателя должны самостоятельно решить типовые задачи, используя материалы лекций, учебных пособий и образцы решения приведенных в методических указаниях задач.

На каждом занятии студентам предлагается решить 1–2 задачи по определенной теме, которую они заранее должны проработать. Возникающие у студентов вопросы преподаватель, ведущий практические занятия, должен объяснить и сориентировать студентов на решение задач при помощи методов, которые рассматривались на лекциях.

При проведении практических занятий преподавателям целесообразно придерживаться следующей последовательности:

- проверить присутствие студентов на занятиях;
- повторить тему и цель занятия;
- убедиться в готовности студентов к занятиям, выяснить знание ими теоретического материала по данной теме;
- изобразить на доске электрическую схему варианта и рассмотреть порядок решения задачи, предварительно объяснив студентам, что **именно** надо определить, учитывая **исходные данные**;
- если задача может быть решена различными способами, задать каждому студенту свой вариант решения;
- наблюдать за правильностью и рациональностью решения каждым студентом своего варианта, давая необходимые пояснения в затруднительных случаях;
- после того как большинство студентов успешно справятся со своим заданием, следует кратко резюмировать метод решения этого типа задач и предложить остальным студентам **обязательно** закончить решение дома;
- рекомендуется поощрять студентов, выполнивших индивидуальное задание раньше предусмотренного графиком срока;
- защиту индивидуальных заданий производить в те часы, которые предусмотрены графиком, или на консультациях в случае пропусков студентами занятий по **уважительной** причине;
- на защите расчетно-графической работы следует задавать каждому студенту дополнительные вопросы по изученной теме;

– в конце практического занятия следует объявить тему и цель следующего занятия и разделы курса, которые студенты должны изучить к следующему разу.

Тема 1. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

В первой задаче рассмотрен расчет 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: **I 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 к узлу; k – порядковый номер тока.

II 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 резистивных элементов 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 цепи равно

$$U = IR,$$

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

Рассмотрим сложную электрическую цепь (рис. 1.1), содержащую 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. **Произвольно** указывают направления токов во всех контурах. 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 1, 2 и 3:

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 & (\text{узел 1}); \\ -I_5 - I_1 + I_4 &= 0 & (\text{узел 2}); \\ -I_4 - I_2 + I_6 &= 0 & (\text{узел 3}). \end{aligned} \quad (1)$$

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.

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).

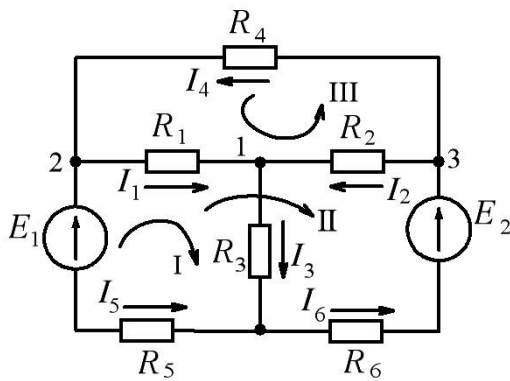


Рис. 1.1.

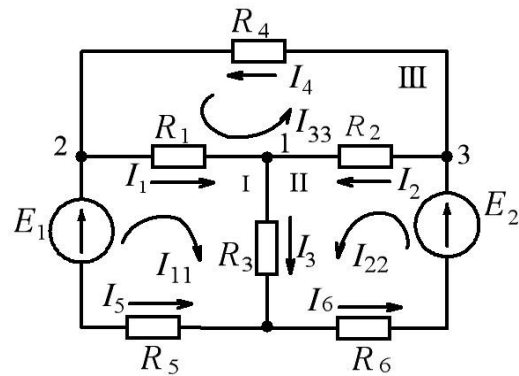


Рис. 1.2.

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.

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Запишем систему уравнений (1–4) в численном виде:

$$\begin{array}{ll} 1I_1 + 1I_2 - 1I_3 = 0; & 5I_1 + 2I_3 - 0,5I_5 = 100; \\ -1I_1 + 1I_4 - 1I_5 = 0; & 5I_1 - 10I_2 - 0,5I_5 - 0,5I_6 = -20; \\ -1I_2 - 1I_4 + 1I_6 = 0. & 5I_1 - 10I_2 + 10I_4 = 0. \end{array}$$

Метод контурных токов

Решаем систему уравнений (5)–(7). Для этого введем обозначения и вычислим значения сопротивлений (Ом).

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_3 + R_5 = 5 + 2 + 0,5 = 7,5; \\ R_{22} &= R_2 + R_3 + R_6 = 10 + 2 + 0,5 = 12,5; \\ R_{33} &= R_1 + R_2 + R_4 = 5 + 10 + 10 = 25; \\ R_{12} &= R_{21} = R_3 = 2; \\ R_{13} &= R_{31} = R_1 = 5; \\ R_{23} &= R_{32} = -R_2 = -10; \\ E_{11} &= E_1 = 100; \\ E_{22} &= E_2 = 120; \\ E_{33} &= 0. \end{aligned}$$

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

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

В численном виде:

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

Любую систему линейных уравнений проще всего 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.

Рекомендуется предложить студентам, которые будут пользоваться компьютерной программой, переписать полученные уравнения (для обоих методов) в удобной для ввода в компьютер форме:

– для каждой системы уравнений составляется квадратичная матрица: число строк должно равняться числу столбцов, которое зависит от количества неизвестных токов, т. е. количества составленных уравнений (например, 6 уравнений, значит, матрица будет – 6×6 и т. д.);

токи с различными индексами должны следовать друг за другом по **порядку**, причем, если какой-либо ток в уравнении отсутствует, значит, коэффициент при этом токе должен равняться 0;

матрица токов записывается слева, а матрица ЭДС – справа.

На основании вышесказанного перепишем составленные системы уравнений.

Запишем коэффициенты при токах и ЭДС в виде матрицы

– для первого метода:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 5 & 0 & 2 & 0 & -0,5 & 0 \\ 5 & -10 & 0 & 0 & -0,5 & 0 \\ 5 & -10 & 0 & 10 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \\ -20 \\ 0 \end{vmatrix},$$

– для второго метода:

$$\begin{vmatrix} 7,5 & 2 & 5 \\ 2 & 12,5 & -10 \\ 5 & -10 & 25 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 \\ -10 \\ 25 \end{vmatrix}.$$

Вводим обе матрицы в компьютер и находим:

– для первого метода **действительные** токи:

$$I_1 = 11,42 \text{ А}; \quad I_2 = 7,7 \text{ А}; \quad I_3 = 19,11 \text{ А}; \quad I_4 = 1,987 \text{ А}; \\ I_5 = -9,43 \text{ А}; \quad I_6 = 9,68 \text{ А};$$

– для второго метода **контурные** токи:

$$I_{11} = 9,43 \text{ А}; \quad I_{22} = 9,68 \text{ А}; \quad I_3 = 1,987 \text{ А}.$$

Далее **алгебраическим** сложением находим **действительные** токи:

$$I_1 = I_{11} + I_{33} = 9,43 + 1,987 = 11,42 \text{ А}; \\ I_2 = I_{22} - I_{33} = 9,68 - 1,987 = 7,7 \text{ А}; \\ I_3 = I_{22} + I_{11} = 9,68 + 9,43 = 19,11 \text{ А}.$$

Остальные действительные токи равны контурным, с учетом знака:

$$I_4 = I_{33} = 1,987 \text{ А} \approx 2 \text{ А}; \\ I_5 = -I_{11} = -9,43 \text{ А}; \\ I_6 = I_{22} = 9,68 \text{ А}.$$

После решения задачи, т. е. нахождения токов двумя методами, необходимо составить **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 берется со знаком «-»:

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

Находим мощность, отдаваемую источником энергии,

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

Находим мощность, потребляемую приемниками:

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

$$2104,6 \approx 2106,7 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{пр}}.$$

Далее можно предложить студентам проверить правильность решения задачи: составить уравнения по I или по II законам Кирхгофа для неиспользованных при решении узлов или контуров, подставить численные значения в составленные уравнения и посмотреть, выполняются ли эти законы.

Тема 2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Необходимо помнить, что все законы и методы решения задач постоянного тока можно применять при решении задач переменного тока только в том случае, если параметры цепей переменного тока представлены **комплексными** числами. Это объясняется тем, что в цепях переменного тока существуют два вида нагрузок (активная и реактивная – индуктивная и емкостная) в отличие от цепей постоянного тока, где существует только омическая нагрузка (R) и никакого угла сдвига фаз между током и напряжением не существует. В цепях переменного тока понятие угла сдвига фаз между током и напряжением (угол φ) играет существенную роль и зависит как по величине, так и по направлению от **характера** нагрузки (активная, индуктивная или емкостная). Этот угол сдвига фаз можно учесть как временными диаграммами и тригонометрическими функциями, так и векторными диаграммами или комплексными числами. Математические операции (сложение, вычитание, умножение и т. д.) синусоидальных функций (ток, напряжение, ЭДС), представленных первыми тремя способами, достаточно трудоемки и недостаточно точны. Эти операции можно существенно упростить, если синусоидальные функции времени изобразить комплексными числами. Из курса математики известно, что любое комплексное число можно представить в алгебраической, три-

гонометрической и в показательной формах, а также в виде вектора на комплексной плоскости.

При расчете цепей синусоидального переменного тока удобнее всего пользоваться **алгебраической** или **показательной** формой представления комплексных чисел.

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

Пример

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

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

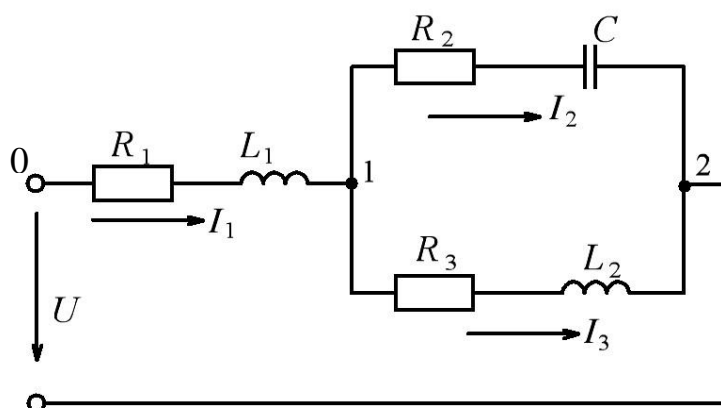


Рис. 2.1.

Решение

При решении задачи необходимо помнить, что **активное** сопротивление (R) является **вещественной** частью комплексного числа с модулем, равным R , **индуктивное** сопротивление является **положительным мнимым** числом с модулем, равным X_L , **емкостное** сопротивление является **отрицательным мнимым** числом комплексного числа с модулем, равным X_C .

1. Выразим сопротивления ветвей в комплексной форме:

$$\underline{Z} = R \pm jX,$$

тогда:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = R_1 + j2\pi \cdot 50 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 10 + j6;$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} = 24 - j \frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 455} = 24 - j7;$$

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

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

2. Находим полное комплексное сопротивление всей цепи, Ом:

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

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 0–1:

$$\dot{U}_{0-1} = \dot{I}_1 Z_1 = (4,11 - j1,82)(10 + j6) = 41,1 + j24,66 - j18,2 + 10,92 = 52 + j6,46.$$

5. Находим напряжение на участке цепи 1–2:

$$\dot{U}_{1-2} = \dot{U} - \dot{U}_{0-1} = 120 - 52 - j6,46 = 68 - j6,46.$$

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

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{1-2}}{Z_2} = \frac{68 - j6,46}{24 - j7} = \frac{(68 - j6,46)(24 + j7)}{(24 - j7)(24 + j7)} = \frac{1667,22 + j320,96}{625} = 2,68 + j0,51;$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{1-2}}{Z_3} = \frac{68 - j6,46}{15 + j20} = \frac{(68 - j6,46)(15 - j20)}{625} = \frac{890,8 - j1456,9}{625} = 1,42 - j2,33.$$

7. Определяем действующие значения токов.

Напомним, что модуль комплексного числа – это корень квадратный из суммы квадратов вещественной части и коэффициента при мнимой части комплексного числа. Модуль комплексного числа – это и есть действующее значение тока:

$$\begin{aligned} I_1 &= |\dot{I}_1| = \sqrt{4,11^2 + 1,82^2} = \sqrt{20,2} = 4,5 \text{ А}; \\ I_2 &= |\dot{I}_2| = \sqrt{2,68^2 + 0,51^2} = \sqrt{7,44} = 2,73 \text{ А}; \\ I_3 &= |\dot{I}_3| = \sqrt{1,42^2 + 2,33^2} = \sqrt{7,44} = 2,73 \text{ А}. \end{aligned}$$

Все операции с комплексными числами необходимо выполнять с помощью компьютерной программы MathCAD в компьютерном классе кафедры.

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

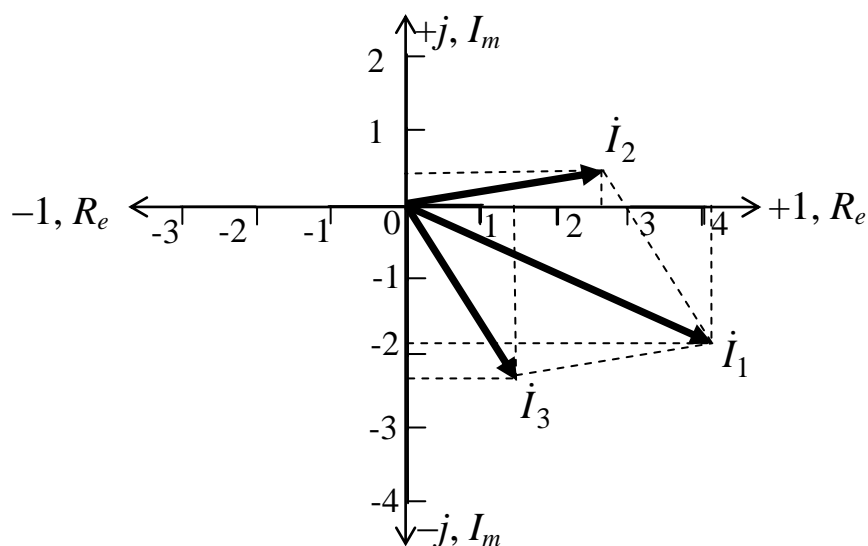


Рис. 2.2

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

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

где I^* – сопряженное значение комплексного тока, выходящего из источника.

Напомним, что сопряженное значение комплексного числа – это такое комплексное число, у которого знак мнимой части меняется на противоположный.

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \dot{U} \cdot I_1^* = 120(4,11 + j1,82) = 493,2 + j218,4.$$

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

Тогда

$$P_{\text{ист}} = 493,2 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{ист}} = 218,4 \text{ вар.}$$

Активные и реактивные мощности **приемников** можно рассчитать по формуле

$$S_{\text{пр}} = I^2 \cdot \underline{Z} = P \pm jQ.$$

Тогда:

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

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

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

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

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

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

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

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

Следует заметить, что, поскольку студенты уже изучили на примере темы 1 методы определения токов в ветвях электрической цепи, целесообразно и эту задачу решать методом непосредственного применения законов Кирхгофа или методом контурных токов, не забывая при этом, что все полные сопротивления ветвей надо выразить в **комплексной форме**.

Тема 3. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Трехфазные цепи могут быть соединены по схеме «звезда» и по схеме «треугольник». Соединение «звездой» – это такое соединение, при котором все концы фаз приемника (генератора) соединены в одну точку, называемую нейтральной (нулевой) точкой. Соединение «треугольником» – это такое соединение, при котором конец каждой фазы соединяется с началом последующей или начало фазы соединяется с концом предыдущей. Как правило, приемники соединяются и звездой и треугольником, а генераторы – звездой. Трехфазные приемники могут быть симметричными и несимметричными, а генераторы, как правило, должны быть симметричными. Симметричной трехфазной цепью называют такую цепь, у которой в каждой фазе нагрузки равны и по **величине** и по **характеру** ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$), а несим-

метричной – когда нагрузки в каждой фазе не равны или по величине или по характеру ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$).

Рассмотрим расчет таких цепей на следующих примерах.

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

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

Напоминаем, что *индексы* всех электрических величин генератора обозначаются заглавными буквами, а приемника – строчными.

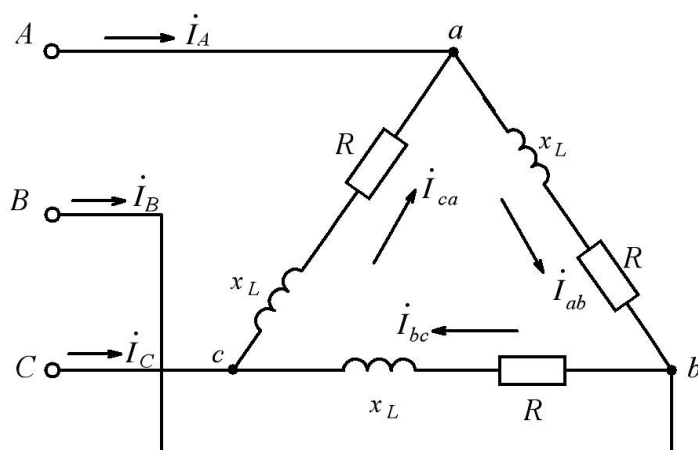


Рис. 3.1

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 (см. 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:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 11 - j11 - 4 - j15 = 7 - j26; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -15 - j4 - 11 + j11 = -26 + j7; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 4 + j15 + 15 + j4 = 19 + j19.\end{aligned}$$

Действующие значения линейных токов

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

4. Для расчета 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 (рис. 3.2) с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ включен «звездой» приемник, 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.

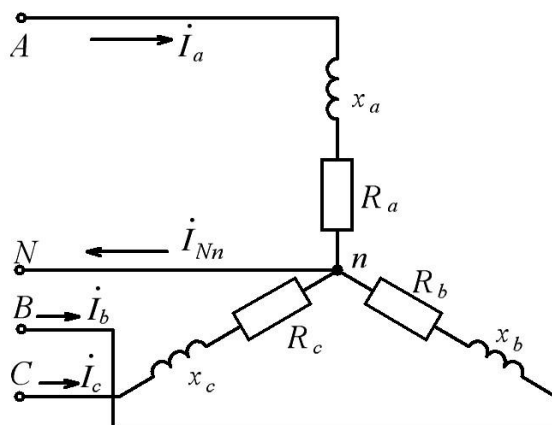


Рис. 3.2

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} I_b &= \sqrt{21,2^2 + 0,005^2} = 21,2 \text{ А}; \\ \dot{I}_c &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{-63,5 + j110}{4 + j3} = 3,04 + j25,22. \end{aligned}$$

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 $U_{л} = 380 \text{ В}$ включен «звездой» приемник, активное, индуктивное и емкостное сопротивления фаз которого равны: $R = x_L = x_C = 22 \text{ Ом}$ (рис. 3.3).

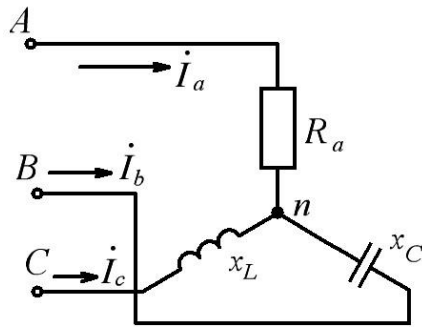


Рис. 3.3

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. Поскольку нагрузка несимметричная, то для того чтобы найти фазные напряжения приемника, 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:

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

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

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 операции с комплексными числами желательно производить в компьютерном классе кафедры или на домашнем персональном компьютере в программе «MathCAD».

Тема 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА, ВОЛЬТМЕТРА И ВАТТМЕТРА

Данная тема относится к разделу электрических измерений. Кроме параметров различных элементов электрической цепи (активного сопротивления R , индуктивной катушки L и коэффициента мощности $-\cos \varphi$), определяются погрешности **косвенного** измерения этих величин с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра.

Студенты на основе самостоятельного изучения методов измерений по материалам лекций, учебников или пособий, должны уметь отличать метод непосредственной оценки от косвенного метода, знать виды погрешностей (абсолютную, относительную и приведенную) и понимать, по которой из них определяется класс точности электромеханических измерительных приборов.

Задача касается определения параметров электрической цепи методом амперметра, вольтметра и ваттметра.

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

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

– полного сопротивления

$$\gamma_Z = \frac{\Delta Z'}{Z'} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{K_V}{100} \cdot \frac{U_{kV}}{U} + \frac{K_{kA}}{100} \cdot \frac{I_{kA}}{I};$$

– коэффициента мощности

$$\gamma_{\cos \varphi} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{K_W}{100} \cdot \frac{U_{kW} \cdot I_{kW}}{P} + \frac{K_V}{100} \cdot \frac{U_{kV}}{U} + \frac{K_{kA}}{100} \cdot \frac{I_{kA}}{I},$$

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 формулам

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{I_{kA}} 100 \% ; \quad \gamma_U = \frac{\Delta U}{U_{kV}} 100 \% ; \quad \gamma_P = \frac{\Delta P}{P_{kW}} 100 \% ,$$

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

Амперметром, вольтметром и ваттметром измерены ток, напряжение и мощность индуктивной катушки. Известны классы точности каждого измерительного прибора (K) и пределы его измерения (I_{kA} и т. д.).

Определить параметры индуктивной катушки, погрешности косвенного измерения и действительные значения (рис. 4).

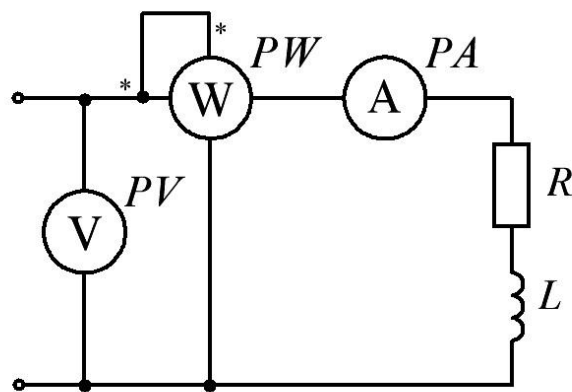


Рис. 4

Дано:

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

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

$$P = 180 \text{ Вт}; K_W = 1; I_{kW} = 2,5 \text{ А}; U_{kW} = 300 \text{ В}.$$

Решение

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

$$\gamma_R = \frac{K_W}{100} \frac{U_{kW} \cdot I_{kW}}{P} + 2 \frac{K_{kA}}{100} \frac{I_{kA}}{I} = \frac{1}{100} \frac{300 \cdot 2,5}{180} + 2 \frac{1}{100} \frac{5}{2} = 0,92;$$

– полного сопротивления

$$\gamma_Z = \frac{K_V}{100} \frac{U_{kV}}{125} + \frac{K_A}{100} \frac{I_{kA}}{I} = \frac{1}{100} \frac{150}{125} + \frac{1}{100} \frac{5}{2} = 0,037;$$

– коэффициента мощности

$$\begin{aligned} \gamma_{\cos \varphi} &= \frac{K_W}{100} \frac{U_{kW} \cdot I_{kW}}{P} + \frac{K_V}{100} \frac{U_{kV}}{U} + \frac{K_A}{100} \frac{I_{kA}}{I} = \\ &= \frac{1}{100} \frac{300 \cdot 2,5}{180} + \frac{1}{100} \frac{150}{125} + \frac{1}{100} \frac{5}{2} = 0,078. \end{aligned}$$

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

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

Тема 5. ОДНОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Следует напомнить, что трансформатором называется статическое (т. е. без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное чаще всего для преобразования одного переменного напряжения в другое (или в другие) напряжение той же частоты, но другой величины. Трансформаторы бывают повышающие и понижающие. Трансформатор имеет не менее двух обмоток с общим магнитопроводом, которые электрически изолированы друг от друга (за исключением автотрансформаторов).

Для усиления индуктивной связи и снижения влияния вихревых токов первичные и вторичные обмотки трансформаторов размещаются на магнитопроводе, собранном из листовой электротехнической стали. Магнитопровод отсутствует только в воздушных трансформаторах, которые применяются, когда частота свыше 20 кГц, при которой магнитопровод практически не намагничивается из-за значительного увеличения вихревых токов.

На электрических станциях (в месте производства электрической энергии) выгодно повышать напряжение до десятков, сотен тысяч вольт и выше (35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ и выше), так как чем выше напряжение, тем меньше ток при той же передаваемой мощности, следовательно, требуется меньшее сечение проводов линии передачи. Далее электрическую энергию передают по проводам к расположенным в районах потребления понижающим подстанциям, где напряжение понижается до 6, 10 кВ. Эти напряжения используются для питания мощных электродвигателей и приемников, а также трансформаторов, понижающих напряжение до 380, 220 В.

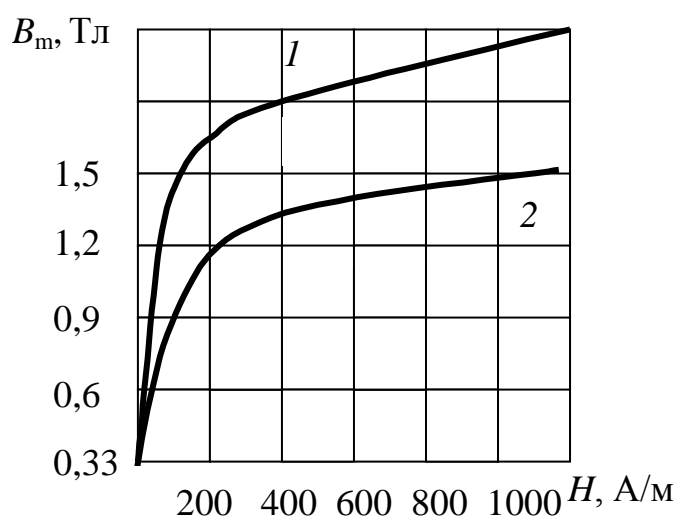
Задача, предложенная студентам, касается расчета основных характеристик однофазного трансформатора на максимальный коэффициент полезного действия при коэффициенте нагрузки ($K_{нг} = 0,7$) и заданных конфигурации магнитопровода и типе электротехнической стали.

Пример

Исходные данные для расчета приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ варианта	S_H , ВА	U_1 , В	U_2 , В	$\cos \varphi_2$	l_{cp} , м	$\operatorname{tg} \varphi_k$	Тип стали
55	500	220	36	0,7	0,4	2,5	1511



Кривые намагничивания трансформаторной стали:
1 – сталь 3405; 2 – сталь 1511

Решение

1. Определяем номинальные токи обмоток:

$$I_1 = \frac{S_H}{U_1} = \frac{500}{220} = 2,27 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{S_H}{U_2} = \frac{500}{36} = 13,9 \text{ А}.$$

2. В соответствии с кривой намагничивания стали 1511, приведенной ниже, определяем 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 $P_{уд} = 2,1 \text{ Вт/кг}$ (табл. 5.2).

Таблица 5.2

B_m , Тл	0,5	1,0	1,25	1,4	1,5	1,6	1,7
$P_{уд}$, Вт/кг (сталь 3405)	0,1	0,5	0,9	1,05	1,4	1,7	2,0
$P_{уд}$, Вт/кг (сталь 1511)	0,3	1,2	1,85	2,4	2,8	–	–

3. Примем допустимую величину тока холостого хода:

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

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

$$N_1 I_{10} = l_{cp} \cdot H; \quad N_1 = \frac{H l_{cp}}{I_{10}},$$

где N_1 – число витков:

$$N_1 = \frac{600 \cdot 0,4}{0,23} = 1043.$$

5. Определяем коэффициент трансформации

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

$$K = \frac{220}{36} = 6,1.$$

6. Определяем число витков вторичной обмотки трансформатора

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

7. Определяем активное сечение магнитопровода (q). Поскольку $U = 4,44 \Phi f N$, а $\Phi = Bq$, тогда:

$$q = \frac{U \cdot 10^4}{4,44 B_m f N_1} = \frac{220 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 1,35 \cdot 50 \cdot 1043} = 7,04 \text{ см}^2.$$

8. Рассчитываем сечение сердечника с учетом коэффициента заполнения пакета

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

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

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

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

Проверка: Сердечник рассчитан верно, если относительный вес (g) на каждые 100 Вт номинальной мощности составляет не более 0,4–0,5 кг.

$$G_c = g \frac{S_H}{100}, \text{ откуда } g = \frac{G_c}{S_H} 100 = \frac{2,39}{500} 100 = 0,478 \text{ кг},$$

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

$$U_{кз} = \frac{U_{ка}}{\cos \varphi_k} = \frac{I_{1H} R_k}{\cos \varphi_k} = 2,27 \cdot \frac{1,94}{0,375} = 11,9 \text{ В},$$

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

$$g = \frac{G_c}{S_H} 100 = \frac{2,39 \cdot 100}{500} = 0,478 \text{ кг}.$$

В процентном отношении это составит:

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

Эта величина должна удовлетворять соотношению

$$U_{кз} \leq 8 \%$$

13. Построить внешнюю характеристику трансформатора:

$$U_2 = f(K_{нГ}) \text{ и зависимость КПД } \eta = f(K_{нГ});$$

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

$U_{ка}$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания, равная

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

где $U_{кр}$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, равная

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

$$U_2 = U_{2н} - \Delta U_2.$$

Задаваясь значениями коэффициента нагрузки $K_{нГ} = 0 \dots 1,3$, получим уменьшение вторичного напряжения ΔU_2 . Результаты расчета сведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

$K_{нГ}$	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

$$\eta = \frac{K_{нГ} S_H \cos \varphi_2}{K_{нГ} S_H \cos \varphi_2 + K_{нГ} P_M + P_{ст}},$$

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

Результаты расчета сведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

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

На рис. 5.1 приведены графики соответствующих зависимостей:

$$U_2 = f(K_{\text{HT}}) \text{ и } \eta = f(K_{\text{HT}}).$$

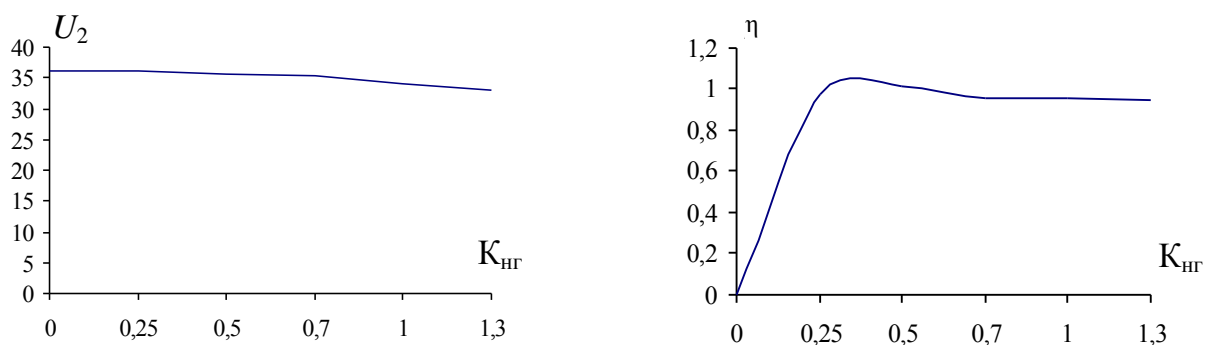


Рис. 5.1

Тема 6. РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Данная тема относится к разделу промышленной электроники. Необходимо вспомнить, что выпрямительные устройства строятся на полупроводниковых приборах – диодах, действие которых основано на свойствах $p-n$ перехода, поэтому проводимость полупроводников может меняться в широких пределах в зависимости от температуры нагрева, освещенности, воздействия электрических полей, примеси посторонних атомов и т. д. Эти особенности широко используются в технике.

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток. Такие выпрямители предназначены для питания постоянным то-

ком различных систем и устройств промышленной электроники, решающих задачи управления, регулирования, переработки, отображения информации и т. д.

При относительно небольшой мощности нагрузки (до нескольких сотен ватт) задачу преобразования электрической энергии переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в постоянный решают с помощью однофазных выпрямителей.

Основными элементами однофазного выпрямителя являются трансформатор и вентили (диоды), с помощью которых обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения к выходным зажимам выпрямителя подключают сглаживающий фильтр.

Режим работы и параметры отдельных элементов выпрямителя и фильтра 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:

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

Решение

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

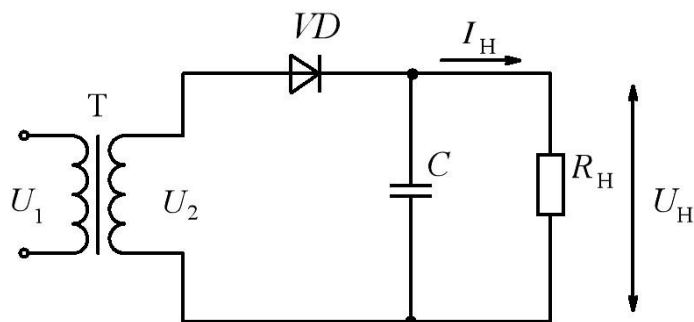


Рис. 6.1

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

– прямой ток через диод $I_{пр}$:

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

– обратное напряжение $U_{обр}$:

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

Таблица 6.1

Параметры для выбора диода

Тип выпрямителя	Параметры					
	$\frac{U_2}{U_{н.ср.}}$	$\frac{U_{обр.}}{U_{н.ср.}}$	$\frac{I_{пр.}}{I_{н.ср.}}$	$\frac{I_1}{I_{н.ср.}}$	Частота основной гармоники $f_{ог}$, Гц	Мощность трансформатора $\frac{S_{тр.}}{P_n}$
Однофазный, одно-полупериодный	2,22	3,14	1,0	1,21	50	3,49
Однофазный, двух-полупериодный (мостовой)	1,11	1,57	0,5	1,11	100	1,23

--	--	--	--	--	--	--

3. Исходя из найденных $I_{пр}$ и $U_{обр}$ по табл. 6.2 выбираем диод типа 2Д251А. Выписываем параметры выбранного диода:

– максимальный прямой ток $I_{пр.мах} = 10 \text{ А}$,

– максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах} = 50 \text{ В}$,

– прямое падение напряжения на диоде $U_{пр} = 1 \text{ В}$.

4. Определяем активную мощность на нагрузке:

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

5. Определяем эквивалентное сопротивление нагрузки

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

6. Определяем величину емкости C -фильтра.

Емкость конденсатора выбирается из условия, что емкостное сопротивление x_C для основной гармоники должно быть много меньше (в 5–10 раз), чем сопротивление нагрузки R_H , т. е.

$$x_C = \frac{R_H}{(5-10)},$$

где $x_C = \frac{1}{2\pi f C}$,

откуда

$$C = \frac{(5-10)}{2\pi f R_H} = \frac{5}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,6} = 9,952 \cdot 10^{-3} \text{ Ф} = 9952 \text{ мкФ}.$$

7. Определяем полную мощность трансформатора (табл. 6.1):

$$S_{\text{тр}} = 3,49 \cdot P_H = 3,49 \cdot 40 = 139,6 \text{ ВА}.$$

8. По значениям величин табл. 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

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

9. Рассчитаем коэффициент трансформации трансформатора по напряжению

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{17,76} = 12,39.$$

10. Определяем коэффициент полезного действия выпрямителя:

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

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери в трансформаторе, т. е.

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

Значение КПД 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

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

где N – общее число диодов в схеме.

Пример 2.

Исходные данные: $U_{\text{н.ср}} = 8 \text{ В}$, $I_{\text{н.ср}} = 5 \text{ А}$, $U_1 = 220 \text{ В}$.

Решение

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

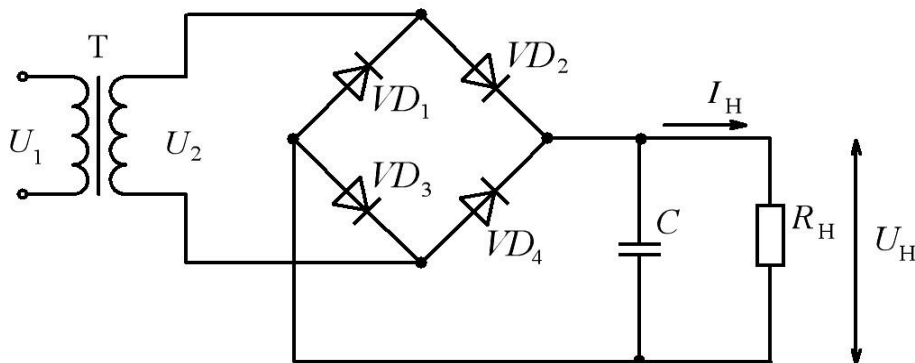


Рис. 6.2

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

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

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

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

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

Таблица 6.2

Справочные данные по диодам (фрагмент каталога)

Тип диода	$I_{\text{пр.мах}}$, А	$I_{\text{обр.мах}}$, мкА	$U_{\text{обр.мах}}$, В	$U_{\text{пр.мах}}$, 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
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

Студенты, которые не смогли по своим расчетным данным выбрать диод из приведенного фрагмента, могут воспользоваться электронной базой в компьютерном классе кафедры.

3. Исходя из найденных $I_{пр}$ и $U_{обр}$ по табл. 6.2 выбираем диод типа 2Д222АС. Выписываем параметры выбранного диода:

- максимальный прямой ток $I_{пр. max} = 3A$,
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр. max} = 20 В$,
- прямое падение напряжения на диоде $U_{пр} = 0,6 В$.

4. Определяем активную мощность на нагрузке:

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

5. Определяем эквивалентное сопротивление нагрузки:

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

6. Определяем величину емкости C -фильтра. Емкость конденсатора выбирается из условия, что емкостное сопротивление x_C для основной гармоники должно быть много меньше (в 5–10 раз), чем сопротивление нагрузки R_H , т. е.

$$x_C = \frac{R_H}{(5-10)},$$

где $x_C = \frac{1}{2\pi f C}$,

откуда

$$C = \frac{(5-10)}{2\pi f_{ог} R_H} = \frac{10}{2\pi \cdot 100 \cdot 1,6} = 9,952 \cdot 10^{-3} \text{ Ф} = 9952 \text{ мкФ.}$$

7. Определяем полную мощность трансформатора (см. табл. 6.1):

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

8. По значениям величин из табл. 6.1 определяем параметры трансформатора:

- напряжение на вторичной обмотке

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

– ток первичной обмотки

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

9. Рассчитаем коэффициент трансформации трансформатора по напряжению

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{8,88} = 24,77.$$

10. Определяем коэффициент полезного действия выпрямителя

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Delta P_{тр} + \Delta P_D} \cdot 100 \% = \frac{40}{40 + 0,89 + 7,2} 100 \% = 83 \%,$$

где $\Delta P_{тр}$ – потери в трансформаторе, т. е.

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

Значение коэффициента полезного действия трансформатора $\eta_{тр}$ при номинальной нагрузке выбирается в пределах 0,97–0,99.

Значение коэффициента мощности трансформатора $\cos \varphi$ выбирается в пределах 0,87–0,95; ΔP_D – потери мощности в диодах:

$$\Delta P_D = I_{пр.макс} U_{пр.макс} N = 3 \cdot 0,6 \cdot 4 = 7,2 \text{ Вт,}$$

где N – общее число диодов в схеме.

Тема 7. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Правильный выбор электродвигателя существенно зависит от режима работы электропривода. Кроме того, надо учитывать, что при росте нагрузки температура двигателя и его изоляции возрастает и может достигнуть опасных значений, превышающих допустимые, что приведет к перегреву двигателя и даже к его разрушению.

Нагрев и охлаждение двигателей также зависят от различных режимов работы электропривода.

Для того чтобы определить номинальную мощность электродвигателя, по которой он выбирается из каталога, надо знать **нагрузочную диаграмму** для различных режимов, учитывать то, что двигатель должен удовлетворять условиям допустимого нагрева, обладать максимальным моментом, достаточным для преодоления кратковременных перегрузок, а при пуске двигатель должен иметь избыточный пусковой момент для обеспечения его разгона.

Основными режимами работы электропривода являются:

- длительный режим с постоянной и переменной нагрузками (S 1);
- кратковременный режим (S 2);
- повторно-кратковременный режим (S 3).

В рассматриваемой задаче надо определить мощность, необходимую для привода механизма, работающего в длительном режиме с переменной нагрузкой, и выбрать соответствующий асинхронный двигатель.

Пример

Исходные данные для расчета.

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:

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

Решение

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

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

2. Строим нагрузочную диаграмму (рис. 7.1).

3. Определяем расчетную мощность двигателя при номинальной частоте вращения:

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

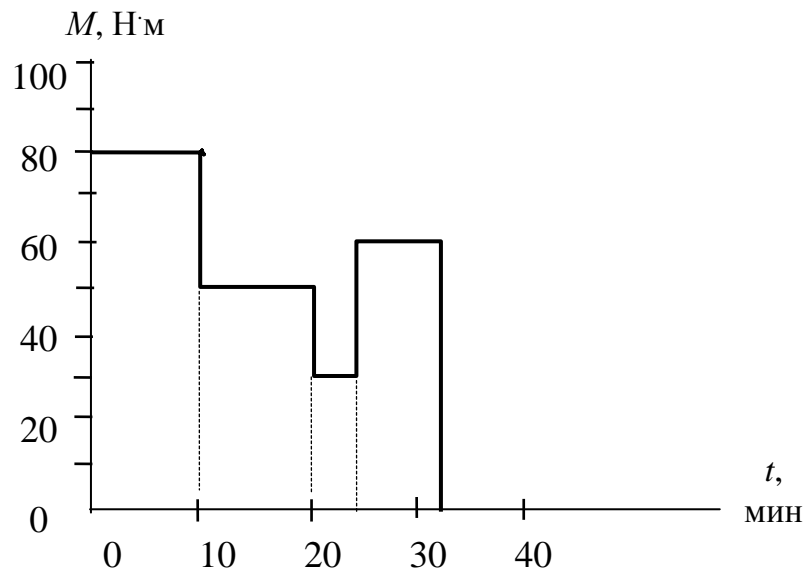


Рис. 7.1

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

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	η , %					
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
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

Выбранный двигатель 5AM112MA8 имеет следующие паспортные характеристики: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 2,2$ кВт; номинальная частота вращения $n_{\text{дн}} = 710$ 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 момента к номинальному ($K_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 2,5$), 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 $i_{\text{ст}} = 2,5$.

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

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

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

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

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

8. Производим проверку выбранного двигателя по перегрузочной способности.

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

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

Проверка производится по соотношению

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

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

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

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 ($K_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$).

Студенты, которые не смогли по своим расчетным данным выбрать двигатель из приведенного фрагмента, могут воспользоваться электронной базой в компьютерном классе кафедры.

Тема 8. ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Экономия электрической энергии на промышленных предприятиях имеет очень большое значение, так как позволяет за счет рационального использования энергетических ресурсов повышать производительность предприятия и расширять предприятия без значительного наращивания общей установленной энергетической мощности. Для оценки эффективности использования электрической энергии служит ряд показателей, одним из которых является коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}.$$

Коэффициент мощности – один из важнейших показателей, характеризующих загрузку установленного оборудования. С уменьшением $\cos \varphi$ возрастают электрические потери в сетях за счет реактивных токов. Чем больше реактивная мощность при постоянной активной мощности, тем ниже $\cos \varphi$ предприятия. Приемники электрической энергии предприятий потребляют как активную, так и реактивную электрическую энергию. Основными потребителями реактивной энергии являются асинхронные двигатели ($\approx 70\%$), трансформаторы ($\approx 20\%$), воздушные сети и различные машины и аппараты, имеющие индуктивность ($\approx 10\%$); поэтому реактивную мощность необходимо компенсировать, чтобы увеличить коэффициент мощности предприятия.

Одним из способов повышения $\cos \varphi$ является установка статических конденсаторов или компенсирующих устройств с автоматическим регулированием. Приведенная ниже задача (рис. 8.1) касается вопроса снижения уровня реактивной мощности в электрических сетях (повышение коэффициента мощности) за счет включения конденсатора, величину которого необходимо рассчитать.

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

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

где Q_{xx} – реактивная мощность холостого хода АД, равная

$$Q_{xx} = \frac{P_H m}{\eta},$$

где m – расчетный коэффициент, зависящий от номинального коэффициента мощности $\cos \varphi_H$ (рис. 8.2); Q_H – реактивная мощность АД при номинальной нагрузке

$$Q_H = \frac{P_H \operatorname{tg} \varphi_H}{\eta}.$$

Суммарная реактивная мощность, подлежащая компенсации при работе двух АД,

$$Q_k = Q_{AD_1} + Q_{AD_2}.$$

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

$$C = \frac{Q_{c\phi} \cdot 10^6}{314 U_{\phi}^2} \text{ (мкФ)},$$

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) для работы двух асинхронных двигателей, подключенных к сети трехфазного тока

($Q_{c\phi} = \frac{Q_k}{3}$), окончательная расчетная формула имеет вид: $C = \frac{Q_k \cdot 10^6}{942 U_{\phi}^2}$.

Пример расчета (рис. 8.1)

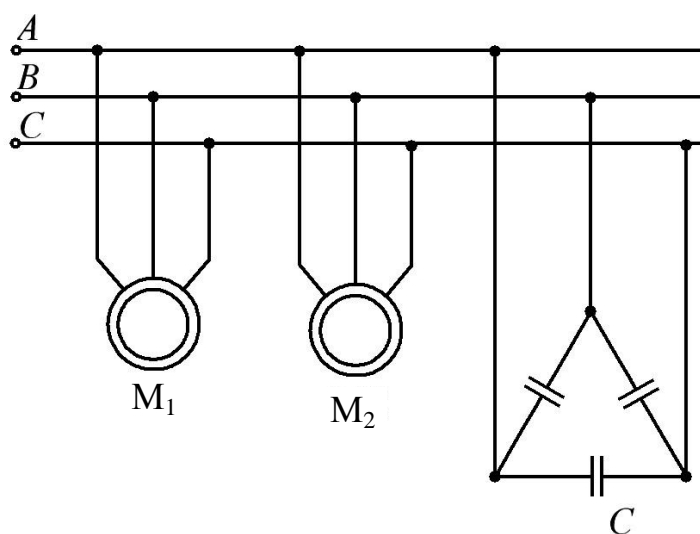


Рис. 8.1

Исходные данные представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

$U_{л},$ 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 (M₁):

$$Q_{АД1} = \frac{P_{н1} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{н1}}{\eta_{н1}} = \frac{18,5 \cdot 0,53}{0,9} = 11,1 \text{ квар.}$$

2. Определяем реактивную мощность АД₁ при коэффициенте нагрузки $K_{нГ1} = 0,6$:

$$Q_{0,6} = Q_{xx1} + (Q_{н1} + Q_{xx1}) K_{нГ1}^2,$$

где $Q_{\text{xx}_1} = \frac{P_{\text{H}_1} \cdot m}{\eta_{\text{H}_1}} = \frac{18,5 \cdot 0,35}{0,9} = 7,19$ квар, $m = 0,35$ – находится из графика (рис. 8.2).

$$Q_{\text{АД}_1} = Q_{0,6} = Q_{\text{xx}_1} + (Q_{\text{H}_1} = Q_{\text{xx}_1}) K_{\text{HГ}_1}^2 = 7,19 + (11,1 - 7,19) 0,6^2 = 8,6 \text{ квар.}$$

3. Определяем номинальную реактивную мощность, потребляемую АД₂ (M₂):

$$Q_{\text{АД}_2} = \frac{P_{\text{H}_1} \cdot \text{tg } \varphi_{\text{H}_2}}{\eta_{\text{H}_2}} = \frac{30}{0,91} 0,51 = 16,89 \text{ квар.}$$

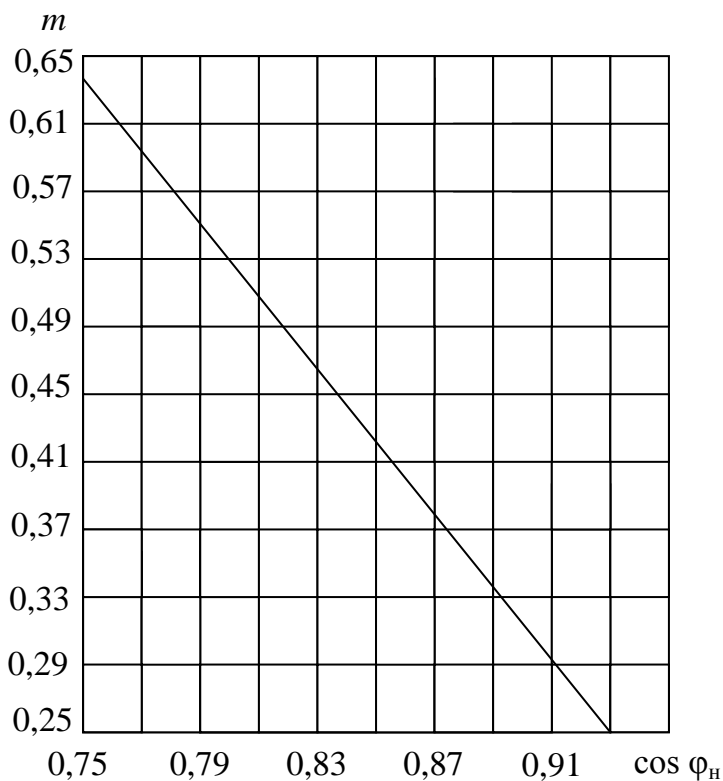


Рис. 8.2

4. Определяем реактивную мощность АД₂ при коэффициенте нагрузки $K_{\text{нг}2} = 0,8$:

$$Q_{\text{АД}2} = Q_{\text{хх}2} + (Q_{\text{н}2} - Q_{\text{хх}2}) K_{\text{нг}2}^2,$$

где $Q_{\text{хх}2} = \frac{P_{\text{н}2} \cdot m}{\eta_{\text{н}2}} = \frac{30}{0,91} 0,35 = 11,54$ квар,

$$Q_{\text{АД}2} = Q_{0,8} = 11,54 + (16,89 - 11,54) 0,64 = 14,96 \text{ квар.}$$

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

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{АД}1} + Q_{\text{АД}2} = 8,6 + 14,96 = 23,56 \text{ квар.}$$

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

$$c_{\text{ф}} = \frac{Q_{\text{к}} \cdot 10^6}{942 U_{\text{ф}}^2} = \frac{23,56 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{942 \cdot 380^2} = 173 \text{ мкФ.}$$

Поскольку конденсаторы соединены в треугольник (см. рис. 8.1), то $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$.

7. Определяем реальную активную мощность двух АД:

$$P = \frac{P_{\text{н}1}}{\eta_{\text{н}1}} K_{\text{нг}1} + \frac{P_{\text{н}2}}{\eta_{\text{н}2}} K_{\text{нг}2} =$$

$$= \left(\frac{18,5}{0,9} \right) 0,6 + \left(\frac{30}{0,91} \right) 0,8 = 12,33 + 26,37 = 38,7 \text{ кВт.}$$

Все необходимые вычисления для решения задачи желательно проводить в компьютерном классе кафедры, пользуясь программой MathCAD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Тема 1. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ	6
Тема 2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬ- НОГО ТОКА	13
Тема 3. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ СИНУ- СОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	18
Тема 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА, ВОЛЬТМЕТРА И ВАТТМЕТРА	26
Тема 5. ОДНОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ	30
Тема 6. РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	35
Тема 7. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	43
Тема 8. ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	54

Афанасьева Наталия Александровна
Ерофеева Ирина Александровна

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания
к практическим занятиям по курсу
«Электротехника и электроника»
для преподавателей и студентов
очной и заочной форм обучения

Редактор

Р.А. Сафарова

Корректор

Н.И. Михайлова

Компьютерная верстка

Н.В. Гуральник

Подписано в печать 30.11.2009. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 3,02. Печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,13

Тираж 500 экз. Заказ № С 65

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