

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электротехники

Электроснабжение с основами электротехники

*Методическое пособие для изучения дисциплины
и выполнения контрольных заданий*

Факультет заочного и дистанционного обучения

Направление подготовки: 08.03.01 – Строительство

Профили подготовки: Промышленное и гражданское строительство

Водоснабжение и водоотведение

Вологда

2014

Электроснабжение с основами электротехники: методическое пособие для изучения дисциплины и выполнения контрольных заданий. – Вологда: ВоГУ, 2014- 56 с.

Методическое пособие содержит краткие теоретические сведения по следующим разделам электротехники: однофазные и трехфазные цепи синусоидального переменного тока, трансформаторы, машины постоянного тока, асинхронные машины, основы электроснабжения. Приведены варианты заданий и примеры их выполнения. Пособие предназначено для студентов заочной формы обучения направления бакалавриата 08.03.01 – Строительство.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГУ

Составители: Н.А. Завьялова, доцент
В.Н. Осовской, ст. преподаватель

Рецензент А.М. Водовозов, канд. техн. наук, профессор

Подписано в печать 23.06.2014. Усл. печ. л. 3,5. Тираж 20 экз.
Печать офсетная. Бумага офисная. Заказ № _____

Отпечатано: РИО ВоГУ, г. Вологда, ул. С. Орлова, 6

ВВЕДЕНИЕ

Методическое пособие предназначено для студентов заочной формы обучения направления бакалавриата 08.03.01 – Строительство (профили подготовки: промышленное и гражданское строительство; водоснабжение и водоотведение).

В пособии приведены теоретические сведения по следующим разделам электротехники: однофазные цепи переменного тока, трёхфазные цепи, трансформаторы, машины постоянного тока, асинхронные машины, основы электроснабжения.

Подробно рассмотрены примеры решения задач по указанным разделам электротехники.

Пособие предназначено для самостоятельной работы при изучении курса и выполнения контрольных заданий.

Целью заданий является приобретение необходимых знаний об основных методах расчёта и физических процессах, которые происходят в однофазных и трёхфазных цепях, а также в трансформаторах и электрических машинах, что способствует более глубокому пониманию теоретического материала и применению его на практике.

1. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ЗАДАНИЙ

Перед выполнением заданий следует изучить необходимый материал, приводимый в данном пособии и рекомендуемой литературе.

При оформлении каждой задачи следует привести условие задачи, исходную схему и, если требуется, схему замещения с принятыми буквенными обозначениями и численными значениями величин. Все рисунки и схемы должны быть выполнены аккуратно и в соответствии с принятыми условными графическими обозначениями, желательно с использованием компьютера. Векторные диаграммы напряжений и токов должны быть показаны в соответствии с принятым масштабом.

При оформлении работы необходимо привести все расчетные формулы. Каждый этап решения должен сопровождаться пояснениями и алгебраическими вычислениями, из которых виден полученный конечный результат.

Числовые значения расчетных величин должны иметь единицы измерений в системе Си.

Пояснительная записка оформляется на листах белой бумаги формата А4 (210х297мм). Размеры полей следующие: левое – 30мм, правое – не менее 10 мм, верхнее – не менее 15мм, нижнее – не менее 20 мм. Рамка на страницах не выполняется.

Текст пояснительной записки, оформленной на компьютере, должен иметь размер шрифта 14, расстояние между строками – 1.5 интервала.

При оформлении пояснительной записки вручную размер текста должен быть не менее, чем в компьютерном варианте.

Пояснительная записка должна быть пронумерована, сшита и иметь титульный лист в соответствии с образцом, приведенным в приложении.

Студент должен выполнить свой вариант задания, который определяется по двум последним цифрам номера зачетной книжки студента, если он не превышает 50, и 3-й цифре с конца номера зачетной книжки, если две последние цифры более 50.

2. ПРОГРАММА УЧЕБНОГО КУРСА

1. Основные понятия теории электрических цепей.
2. Однофазные цепи переменного тока. Способы представления синусоидальных величин. Последовательное, параллельное, смешанное соединение элементов. Векторные диаграммы. Баланс мощностей в цепи переменного тока.
3. Трёхфазные цепи. Соединение нагрузки звездой и треугольником при различных режимах работы цепи. Мощность трёхфазной цепи.
4. Трансформаторы. Назначение и принцип действия. Режимы холостого хода и короткого замыкания трансформатора. Нагрузочный режим трансформатора. Потери мощности и КПД. Трёхфазные трансформаторы.
5. Машины постоянного тока. Устройство и принцип действия машины постоянного тока. Способы возбуждения машины постоянного тока. Работа в режиме двигателя постоянного тока. Работа в режиме генератора постоянного тока. Пуск, реверсирование и КПД машины постоянного тока.
6. Асинхронные машины. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Пуск асинхронного двигателя. Способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя.
7. Основы электроснабжения. Источники электроэнергии. Качество электроэнергии. Линии электропередачи. Общие схемы электроснабжения. Электрические сети зданий и сооружений. Электрооборудование зданий и сооружений.

3. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Синусоидальным называют периодический ток, закон изменения которого выражается функцией вида

$$i = I_M \sin(\omega t + \varphi_i)^*,$$

где i – мгновенное значение;

I_M – максимальное значение (амплитуда);

φ_i – начальная фаза тока;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – частота;

$T = \frac{1}{f}$ – период синусоидальной функции.

Действующее значение периодического тока определяется по выражению:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

При синусоидальной форме кривой тока:

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

Среднее за половину периода значение тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt.$$

При синусоидальной форме кривой тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} I_M$$

Сдвиг по фазе φ тока относительно напряжения определяется по выражениям:

$$\begin{cases} \sin \varphi = \frac{x}{z} = \frac{b}{y}; \\ \cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{g}{y}; \\ \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \frac{b}{g}. \end{cases}$$

Здесь r – активное сопротивление;

x – реактивное сопротивление;

$z = \sqrt{r^2 + x^2}$ – полное сопротивление цепи;

g – активная проводимость;

b – реактивная проводимость;

$y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – полная проводимость цепи.

В цепи с последовательным соединением L и C различают индуктивное реактивное сопротивление x_L и емкостное реактивное сопротивление x_C .

$$x_L = \omega L, \quad x_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Реактивное сопротивление всей цепи: $x = x_L - x_C$.

Если $x_L > x_C$, то $x > 0$, (преобладает индуктивность).

Если $x_L < x_C$, то $x < 0$, (преобладает емкость).

В цепи с параллельным соединением L и C различают индуктивную реактивную проводимость b_L и емкостную реактивную проводимость b_C :

$$b_L = \frac{1}{\omega L}, \quad b_C = \omega C.$$

Реактивная проводимость всей цепи: $b = b_L - b_C$.

Если $b_L > b_C$, то $b > 0$ (преобладает индуктивность), а если $b_L < b_C$, то $b < 0$ (преобладает емкость).

При последовательном соединении нескольких приемников:

а) активное сопротивление цепи равно арифметической сумме активных сопротивлений приемников:

$$r = \sum_{k=1}^n r_k;$$

б) реактивное сопротивление цепи равно алгебраической сумме реактивных сопротивлений приемников:

$$x = \sum_{k=1}^n x_k.$$

Индуктивные сопротивления берут со знаком плюс, емкостные - со знаком минус.

При параллельном соединении нескольких приемников:

а) активная проводимость цепи равна арифметической сумме активных проводимостей приемников:

$$g = \sum_{k=1}^n g_k$$

б) реактивная проводимость цепи равна алгебраической сумме реактивных проводимостей приемников:

$$b = \sum_{k=1}^n b_k.$$

Индуктивные проводимости берут со знаком (+), а емкостные проводимости со знаком (-).

Соотношение для эквивалентного преобразования цепи с последовательным соединением r, x в цепь с параллельным соединением g, b .

$$g = \frac{r}{z^2} = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad b = \frac{x}{z^2} = \frac{x}{r^2 + x^2}$$

Соотношения для эквивалентного преобразования цепи с последовательным соединением g, b в цепь с последовательным соединением r, x .

$$r = \frac{g}{y^2} = \frac{g}{g^2 + b^2}; \quad x = \frac{b}{y^2} = \frac{b}{b^2 + g^2}$$

Закон Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{z} = Uy$$

Активные и реактивные составляющие напряжения и тока

$$\begin{cases} U_a = rI = U \cos \varphi; \\ U_p = xI = U \sin \varphi; \\ U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}. \end{cases} \quad \begin{cases} I_a = gU = I \cos \varphi \\ I_p = bU = I \sin \varphi \\ I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \end{cases}$$

Мгновенная мощность электрической цепи при синусоидальном напряжении и токе (при $\psi=0$)

$$p = UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)].$$

Активная мощность цепи переменного тока

$$P = UI \cos \varphi = I^2 r = U^2 g = UI_a = U_a I.$$

Реактивная мощность цепи переменного тока

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 x = U^2 b = UI_p = U_p I$$

Полная мощность цепи переменного тока

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI = I^2 Z = U^2 y$$

Активную мощность измеряют в ваттах (Вт), реактивную- в вольт-амперах реактивных (ВАр) и полную - в вольт-амперах (ВА).

Построение векторных диаграмм

Если вращать против часовой стрелки с угловой скоростью ω вектор, длина которого в масштабе равна амплитуде синусоиды, то проекция этого вектора на вертикальную ось дает мгновенное значение синусоиды.

На одной векторной диаграмме можно строить только те векторы, которые изображают синусоиды одной частоты, так как только в этом случае все векторы вращаются с одинаковой скоростью, и их взаимное расположение остаётся неизменным.

При построении векторной диаграммы выбирают по ГОСТ масштабы для токов, напряжений, магнитных потоков и т.д. Один из векторов считают основным и направляют по своему усмотрению, например, вертикально вверх. Выбор основного вектора производят исходя из удобства построения всех последующих векторов. Например, при последовательном соединении приемников принимают за основной вектор тока, так как ток протекает по всем элементам цепи, поэтому векторы падений напряжения на всех элементах легко построить. При параллельном соединении приемников за основной принимают вектор напряжения сети, так как в такой цепи с напряжением связаны токи во всех ветвях и их легко построить, зная направление вектора напряжения.

При построении векторных диаграмм следует помнить следующие положения:

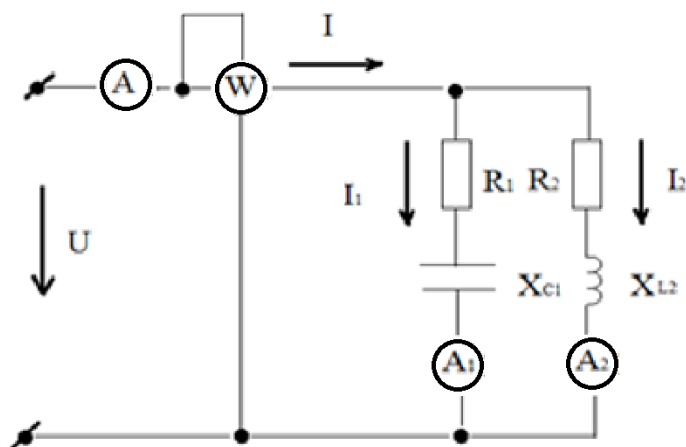
- в активном сопротивлении вектор тока совпадает по направлению с вектором падения напряжения;
- в индуктивном сопротивлении вектор тока отстаёт по направлению от вектора напряжения на угол 90° ;
- в емкостном сопротивлении вектор тока опережает по направлению вектор падения напряжения на угол 90° ;
- вектор э. д. с., индуцированной в катушке вследствие изменения сцепленного с ней магнитного потока, отстаёт по направлению от вектора магнитного потока на угол 90° ;
- вектор напряжения, уравнивающего э. д. с., равен по величине вектору э.д.с. и сдвинут относительно него на угол 180° ;

- в треугольнике сопротивлений угол между катетом r и гипотенузой z равен φ ;
- в треугольнике проводимостей угол между катетом g и гипотенузой y также равен φ .

Вопросы для самопроверки:

1. Что называется мгновенным и амплитудным значениями напряжения и тока?
2. Дайте определение периода и частоты переменного тока и укажите, в каких единицах они измеряются.
3. Как выражается зависимость частоты переменного тока от числа пар полюсов и скорости вращения генератора?
4. Как изобразить синусоидальные величины при помощи векторных диаграмм?
5. Какие значения переменного тока и напряжения показывают измерительные приборы?
6. Начертите векторную диаграмму и графики тока, напряжения и мощности цепи с активным сопротивлением?
7. Объясните природу индуктивного сопротивления в цепи при переменном токе.
8. Начертите векторную диаграмму и графики тока, напряжения и мощности цепи с активным и индуктивным сопротивлениями.
9. Начертите треугольник напряжений, сопротивлений и мощности для цепи с активным и индуктивным сопротивлениями.
10. В каких единицах измеряются полная, активная и реактивная мощности?
11. Начертите векторную диаграмму и графики тока, напряжения и мощностей цепи с активным и емкостным сопротивлениями.
12. Начертите треугольник напряжений, сопротивлений и мощностей для цепи с активным и емкостным сопротивлениями.
13. Начертите векторную диаграмму тока и напряжений неразветвленной цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.
14. Укажите условия возникновения резонанса напряжений.
15. Укажите условия возникновения резонанса токов.
16. От чего зависит коэффициент мощности $\cos\varphi$, как и для чего стремятся его повысить?

Задача 1.



Дано:

$$U=200 \text{ В}$$

$$R_1=12 \text{ Ом}$$

$$R_2=8 \text{ Ом}$$

$$X_{C1}=10 \text{ Ом}$$

$$X_{L2}=16 \text{ Ом}$$

Определить:

- показания измерительных приборов;
- реактивную мощность цепи;
- построить векторную диаграмму;

Ток в неразветвлённой части цепи рекомендуется определить по векторной диаграмме.

Решение

Цепь состоит из двух параллельных ветвей. Определяем полные сопротивления ветвей:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2} = \sqrt{12^2 + 10^2} = 15,6 \text{ Ом}$$

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{8^2 + 16^2} = 17,9 \text{ Ом}$$

Опре- делим сдвиг по фазе между входным напряжением и токами параллельных ветвей:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_{C1}}{R_1} = \arctg \frac{10}{12} = 40^\circ$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_{L2}}{R_2} = \arctg 16/8 = 63^\circ$$

Определим токи параллельных ветвей по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{200}{15,6} = 12,8 \text{ А (Показание амперметра } A_1)$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{200}{17,9} = 11,2 \text{ А (Показание амперметра } A_2)$$

Определим активную мощность параллельных ветвей и всей цепи:

$$P_1 = I_1^2 * R_1 = 12,8^2 * 12 = 1966,1 \text{ Вт}$$

$$P_2 = I_2^2 * R_2 = 11,2^2 * 8 = 1003,5 \text{ Вт}$$

$$P = P_1 + P_2 = 1966,1 + 1003,5 = 2969,6 \text{ Вт (Показание ваттметра)}$$

Определим реактивную мощность параллельных ветвей и всей цепи:

$$Q_1 = I_1^2 * X_{C1} = 12,8^2 * 10 = 1638,4 \text{ ВАр}$$

$$Q_2 = I_2^2 * X_{L2} = 11,2^2 * 16 = 2007,1 \text{ ВАр}$$

$$Q = Q_2 - Q_1 = 2007,1 - 1638,4 = 368,7 \text{ ВАр}$$

Определим длины векторов токов:

$$l_{I1} = \frac{I_1}{m_I} = \frac{12,8}{2,5} = 5,12 \text{ см}$$

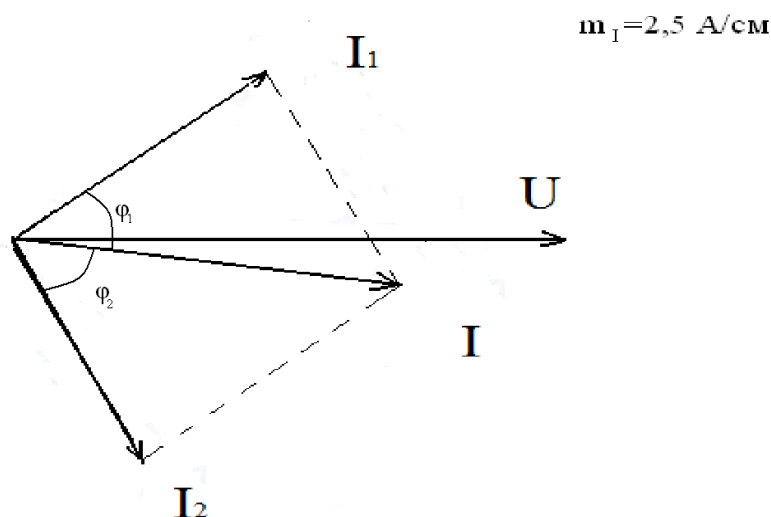
$$l_{I2} = \frac{I_2}{m_I} = \frac{11,2}{2,5} = 4,48 \text{ см}$$

Построение начинаем с вектора напряжения, который откладываем в произвольном масштабе по оси абсцисс. Вектор тока $\bar{I}_1$ опережает напряжение на угол $\varphi_1 = 40^\circ$, что указывает на активно-ёмкостной характер нагрузки, а вектор тока $\bar{I}_2$ отстаёт от напряжения на угол $\varphi_2 = 63^\circ$, что указывает на активно-индуктивный характер нагрузки. Ток неразветвлённого участка цепи определим по I закону Кирхгофа путём сложения векторов $\bar{I}_1$ и $\bar{I}_2$:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2.$$

Так как масштабы всех токов одинаковы, то, измерив длину вектора $\bar{I}$, найдём ток неразветвлённого участка цепи:

$$I = l_I * m_I = 6 * 2,5 = 15 \text{ А (показание амперметра А)}$$



4. ТРЁХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Совокупность трёх электрических цепей, в которых действуют синусоидальные э.д.с. одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе и создаваемые общим источником электрической энергии, называется трёхфазной системой электрических цепей. Отдельные цепи, входящие в состав трёхфазной электрической цепи, называются фазами.

Совокупность трёх э.д.с., напряжений, токов, действующих в фазах трёхфазной цепи, называется трёхфазной системой соответственно э.д.с., напряжений и токов.

Существуют два основных способа соединения трёхфазных цепей: звездой и треугольником.

При этом условные положительные направления э.д.с., напряжений и токов выбирают следующим образом: линейных токов – к приёмнику; фазных токов в сторонах треугольника так, чтобы все они были направлены по стрелке часов; фазных токов в лучах звезды так, чтобы они все сходились в нейтральной точке приёмника; тока в нейтральном проводе и соответственно напряжения между нулевыми точками – от нейтральной точки приёмника к нейтральной точке генератора; фазных и линейных напряжений – подобным же образом, в частности – от предыдущей фазы к последующей. Положительные направления э.д.с. генератора надо выбирать противоположно положительным направлениям напряжений.

ТРЁХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ

Основные теоретические сведения

Трёхфазная симметричная система э.д.с. состоит из трёх э.д.с. одинаковых по амплитуде и частоте, но сдвинутых друг относительно друга по фазе (во времени) на 120° (одну треть периода).

При соединении приёмников трёхфазной системы звездой концы фаз соединяются в общую нейтральную точку, а к началам фаз приёмников подводятся линейные провода. Таким образом получается трёхфазная трёхпроводная система. Трёхфазная система с нейтральным проводом называется четырёхпроводной. В трёхфазных системах различают линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} между любой парой линейных проводов и фазные напряжения на фазе приёмника U_a , U_b , U_c , т.е. напряжение между одним из линейных проводов и нейтральной точкой O' .

Соответствие между линейными и фазными напряжениями можно определить, воспользовавшись уравнениями, составленными по второму закону Кирхгофа для схемы (рис. 1).

$$\begin{aligned}\bar{U}_{AB} - \bar{U}_a + \bar{U}_b &= 0; & \bar{U}_{CA} - \bar{U}_c + \bar{U}_a &= 0; & \bar{U}_{BC} &= \bar{U}_b - \bar{U}_c \\ \bar{U}_{BC} - \bar{U}_b + \bar{U}_c &= 0; & \bar{U}_{AB} &= \bar{U}_a - \bar{U}_b; & \bar{U}_{CA} &= \bar{U}_c - \bar{U}_a\end{aligned}$$

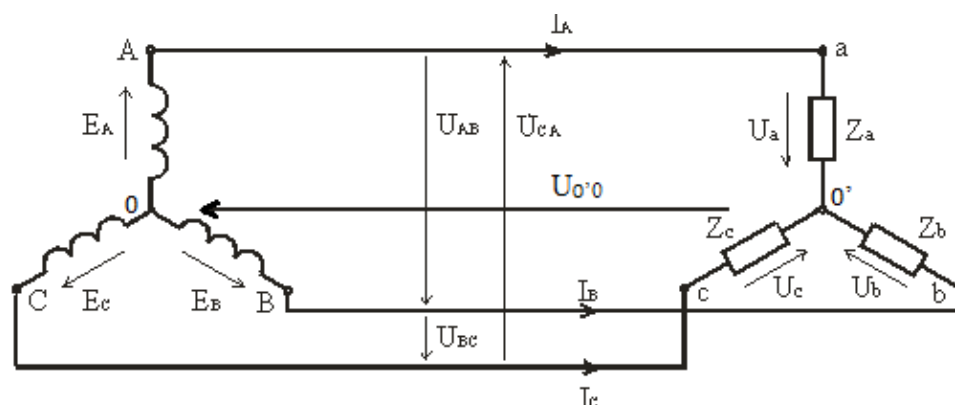


Рис. 1

Различают также линейные токи в линейных проводах и фазные токи в фазах приёмника. На схеме видно, что $I_L = I_\Phi$.

Если сопротивления всех фаз приёмника одинаковы,

$$Z_a = Z_b = Z_c = r$$

то и токи во всех фазах будут одинаковы. При симметричной системе э.д.с. получится симметричная система токов и напряжений (рис. 2).

Из векторной диаграммы видно, что геометрическая сумма фазных токов, сходящихся в нулевой точке, получается равной нулю, что и должно быть по I закону Кирхгофа. $\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$.

Для симметричной системы напряжений справедливо соотношение $U_L = \sqrt{3}U_\Phi$. Если же равномерность нагрузки нарушится, то трёхпроводная трёхфазная система уже не будет симметричной, так как сумма трёх неравных по величине токов перестает быть равной нулю, если эти токи будут по-прежнему составлять друг с другом углы 120° . Нейтральная точка на векторной диаграмме при неравномерной нагрузке фаз сместится в такое положение, при котором геометрическая сумма трёх фазных токов снова станет равной нулю (рис. 4). При этом линейные напряжения останутся неизменными, а фазные напряжения перестанут быть одинаковыми и равными $\frac{U_L}{\sqrt{3}}$. На перегруженной фазе напряжение понизится, а на фазах с меньшей нагрузкой, наоборот, повысится. Величина смещения нейтральной точки из среднего положения называется смещением нейтрали $U_{0'0}$. Величину смещения нейтрали можно опреде-

лечь аналитически по методу узлового напряжения, рассматривая систему как сложную цепь с двумя узлами – нейтральной точкой источника энергии 0 и нейтральной точкой приемника 0':

$$\bar{U}_{0'0} = \frac{\bar{E}_A Y_a + \bar{E}_B Y_b + \bar{E}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

где $\bar{E}_A, \bar{E}_B, \bar{E}_C$ – векторы э.д.с. источника,

Y_a, Y_b, Y_c – полные проводимости отдельных фаз.

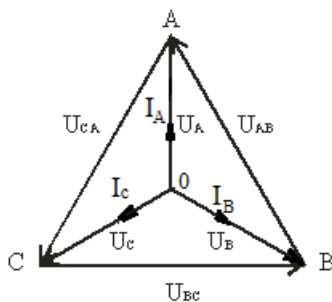


Рис. 2

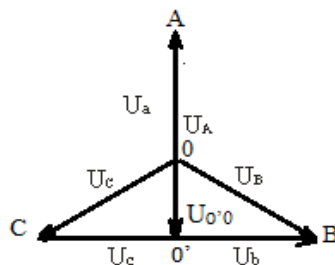


Рис. 3

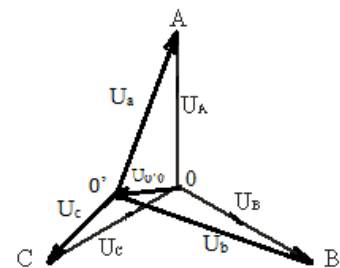


Рис. 4

Сопротивления линейных проводов при выводе формулы приняты равными нулю.

Чтобы восстановить равенство фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз, в систему добавляют четвёртый (уравнительный) провод, соединяющий нейтральную точку приёмников с нейтральной точкой источника энергии и получают, таким образом, трёхфазную четырёхпроводную систему (рис. 5).

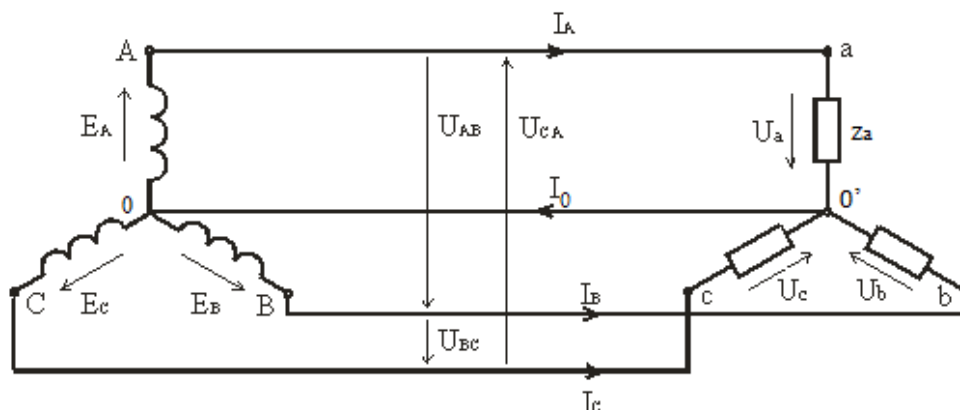


Рис. 5

Благодаря введению нейтрального провода потенциал нейтральной точки приёмника становится равным потенциалу нейтральной точки источника

энергии (если пренебречь сопротивлением нейтрального провода), смещение нейтрали при любой неравномерной нагрузке будет равно нулю, а фазные напряжения будут постоянными и равными своим номинальным значениям. Узловое уравнение для нейтральной точки, в которой теперь сходятся 4 провода, принимает вид

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C - \bar{I}_0 = 0,$$

где $\bar{I}_0$ – ток в нейтральном проводе.

При обрыве одной из фаз (разрыв внутри приёмника или обрыв линейного провода) в трёхпроводной системе, например фазы а (рис. 3) две другие фазы оказываются включёнными последовательно на линейное напряжение U_{BC} . При одинаковом сопротивлении этих фаз $z_b = z_c = r$ на каждую из них вместо фазного напряжения U_ϕ придётся половина линейного напряжения $\frac{U_L}{2}$, что составляет $\frac{U_L}{2} : \frac{U_L}{\sqrt{3}} = 0,87$ от напряжения при нормальном режиме. Нейтральная точка при этом сместится от центра треугольника линейных напряжений на середину одной из сторон, и смещение нейтрали составит $U_{0'0} = 0.5 U_\phi$ (рис. 3).

В четырёхпроводной системе обрыв одной из фаз не нарушит нормальную работу двух других фаз (рис. 8).

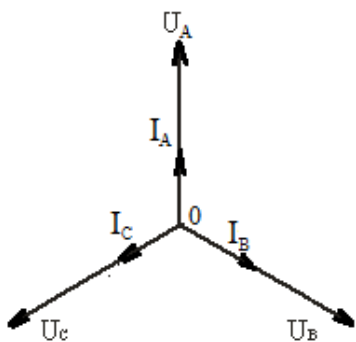


Рис. 6

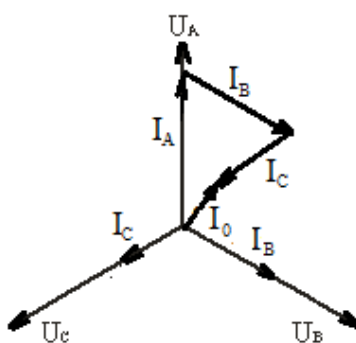


Рис. 7

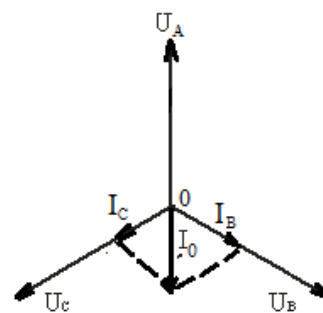


Рис. 8

ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Основные теоретические сведения.

При соединении приёмников трёхфазной системы треугольником конец каждой предыдущей фазы приёмника соединяется с началом последующей, к вершинам образовавшегося таким образом треугольника подводятся линейные провода (рис. 9). В результате получается трехпроводная трехфазная система, в которой различают линейные напряжения между любой парой линейных проводов и фазные напряжения на фазе приёмника. При соединении треугольником фазные напряжения всегда равны линейным, так как к началу и концу данной фазы непосредственно подводятся линейные провода. Следовательно, $U_L = U_\Phi$.

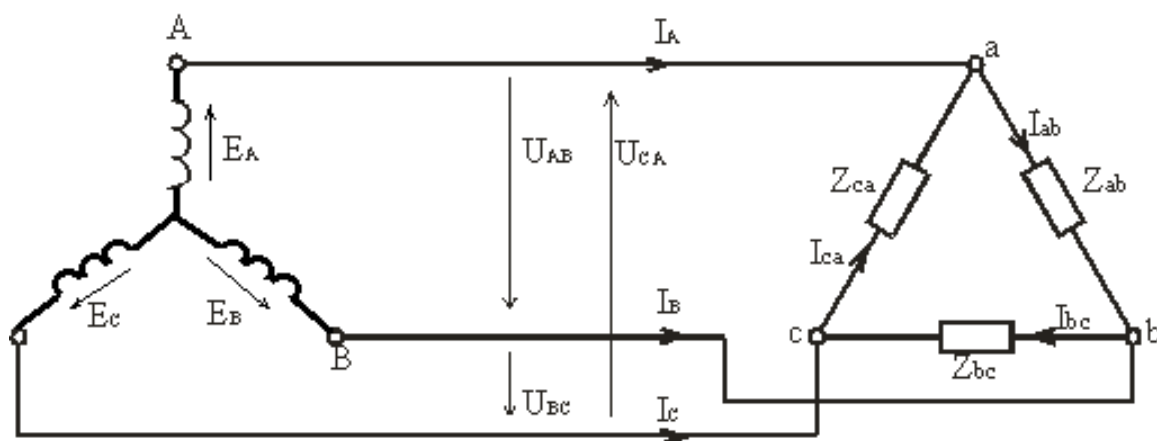


Рис. 9

Различают также токи линейные в линейных проводах I_A , I_B , I_C и фазные в фазах приёмника I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} . Если сопротивления и напряжения фаз нагрузки заданы, то фазные токи определяются по формулам:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; \quad I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; \quad I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}$$

Линейные токи определяются по фазным токам из уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}; \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}; \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}.$$

Из этих уравнений следует, что любой из линейных токов равен геометрической разности токов тех двух фаз, которые соединяются с данным линейным проводом, как указано на векторной диаграмме.

Из уравнений также следует, что независимо от характера нагрузки геометрическая сумма линейных токов трехфазной цепи равна нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Если сопротивления всех фаз приёмника одинаковы,

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = r,$$

то и токи во всех фазах будут одинаковы, получается симметричная система токов (рис.10). Из диаграммы видно, что для симметричной системы токов справедливо соотношение:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi.$$

При неравномерной нагрузке фаз симметрия токов будет нарушена, но это не отразится на фазных напряжениях, так как здесь на фазы приемника подается непосредственно линейное напряжение, определяемое источником энергии. Линейные токи в этом случае определяются графически (рис.12) по векторам диаграмм.

При обрыве одной из фаз, например фазы bc, ток в этой фазе равен нулю. Режим двух других фаз не нарушится, так как на них по-прежнему подаются соответствующие линейные напряжения. В линейном проводе, не связанном с оборванной фазой, линейный ток останется неизменным. Фазные токи двух других фаз станут равными линейным. В этом случае можно воспользоваться соотношениями для узлов, приняв в них ток фазы, в которой произошёл разрыв, равным нулю, то есть $I_{bc} = 0$, тогда

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}; \quad \bar{I}_B = 0 - \bar{I}_{ab}; \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{ca} - 0.$$

Векторная диаграмма представлена на рисунке 11.

При обрыве одного из линейных проводов трехфазная система превращается в однофазную. Напряжение и ток в фазе, не связанной с оборванным линейным проводом, остаются без изменения. Две другие фазы (например, ab и ca) при обрыве линейного провода A оказываются соединенными последовательно и включенными параллельно фазе bc.

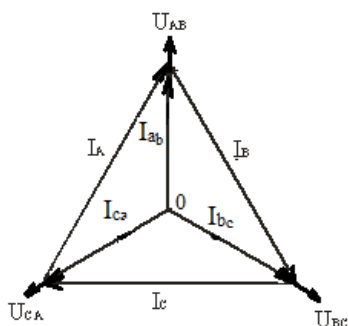


Рис. 10

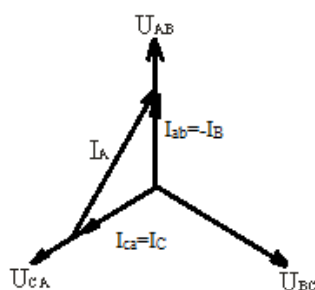


Рис. 11

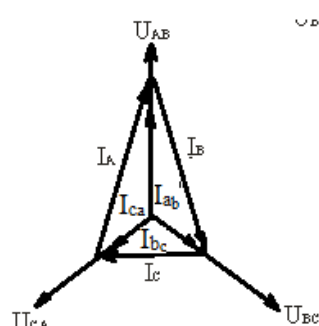


Рис. 12

Короткое замыкание одной из фаз приемника при соединении треугольником приводит к очень большому увеличению фазного и линейных токов и является аварийным режимом.

МОЩНОСТЬ ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ

В трехфазных цепях, так же как и в однофазных, пользуются понятиями активной, реактивной и полной мощностей.

При несимметричной нагрузке следует определить мощность каждой фазы, а затем мощность всей трехфазной цепи.

Активная мощность приемников трехфазной цепи равна сумме активных мощностей отдельных фаз.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз.

При соединении фаз симметричного приемника звездой

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$

$I_{\phi}=I_{\text{л}}$, при соединении треугольником $U_{\phi}=U_{\text{л}}$, $I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$. Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой:

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi,$$

где $U_{\text{л}}$ и $I_{\text{л}}$ - линейные напряжения и ток;

φ – угол сдвига по фазе между U_{ϕ} и I_{ϕ} .

Обычно индексы «л» и «ф» не указывают, и формула принимает вид:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Соответственно реактивная мощность :

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

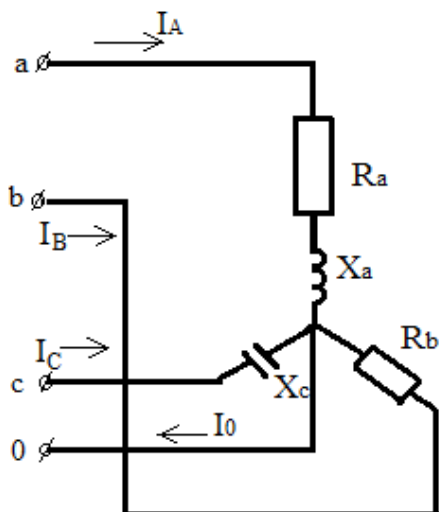
И полная мощность:

$$S = \sqrt{3} UI .$$

Вопросы для самопроверки.

1. Что такое трёхфазная симметричная система э.д.с.?
2. Как приемники трёхфазной системы соединяются звездой?
3. Какие два вида напряжения и токов различаются в трёхфазных системах?
4. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении приёмников звездой?

5. Каково соотношение между линейными и фазными токами при соединении приёмников звездой?
6. При каком условии в трёхфазной симметричной системе э.д.с. получается также симметричная система токов?
7. Что происходит в трёхфазной трёхпроводной системе при соединении приёмника звездой в случае нарушения равномерности нагрузки фаз?
8. Что называется смещением нейтрали?
9. Как аналитически определяется смещение нейтрали в несимметричной трёхфазной системе?
10. Что делается для восстановления симметрии фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз?
11. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной и несимметричной нагрузках?
12. Что происходит в трёхфазной трёхпроводной системе с соединением приёмников звездой при обрыве одной из фаз?
13. Где на практике встречается четырёхпроводная и трёхпроводная системы? Для каких приёмников они применяются?
14. В чём преимущество трёхфазной цепи перед однофазной?
15. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении приёмников треугольником?
16. Что происходит в трёхфазной трёхпроводной системе при соединении приёмников треугольником в случае нарушения равномерности нагрузки фаз?
17. Что происходит в трёхфазной системе с соединением приёмников треугольником при обрыве одной из фаз?
18. Что происходит в трёхфазной системе с соединением приёмников треугольником при обрыве одного из линейных проводов?
19. В каких случаях в трёхфазных цепях используются схемы соединения треугольником?
20. Как изменяются линейные токи, если те же сопротивления приёмников соединить звездой? Приёмник симметричен.



Задача 2.

Дано:

$$U_{\text{Л}} = 220 \text{ В}$$

$$R_a = 6 \text{ Ом}$$

$$X_a = 12 \text{ Ом}$$

$$R_b = 8 \text{ Ом}$$

$$X_c = 4 \text{ Ом}$$

Требуется:

- определить фазные токи;
- определить ток в нейтральном проводе;
- рассчитать активную мощность каждой фазы и всей трёхфазной цепи;
- построить векторную диаграмму токов и напряжений;

Решение

Определить фазное напряжение:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}$$

Определим фазные сопротивления:

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_a^2} = \sqrt{6^2 + 12^2} = 13,4 \text{ Ом}$$

$$Z_b = R_b = 8 \text{ Ом}$$

$$Z_c = X_c = 4 \text{ Ом}$$

По закону Ома рассчитаем фазные токи:

$$I_A = \frac{U_{\phi}}{Z_a} = \frac{127}{13,4} = 9,5 \text{ А}$$

$$I_B = \frac{U_{\phi}}{Z_b} = \frac{127}{8} = 15,9 \text{ А}$$

$$I_C = \frac{U_{\phi}}{Z_c} = \frac{127}{4} = 31,8 \text{ А}$$

Определим углы сдвига векторов фазных токов и напряжений:

$$\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a} = \arctg \frac{12}{6} = 63^{\circ}$$

$$\varphi_b = \arctg \frac{X_b}{R_b} = \arctg \frac{0}{8} = 0^{\circ}$$

$$\varphi_c = \arctg \frac{X_c}{R_c} = \arctg \frac{4}{0} = 90^\circ$$

Активная мощность каждой фазы и всей цепи:

$$P_a = I_A^2 * R_a = 9.5^2 * 6 = 541,5 \text{ Вт}$$

$$P_b = I_B^2 * R_b = 15.9^2 * 8 = 2022,5 \text{ Вт}$$

$$P_c = I_C^2 * R_c = 31.8^2 * 0 = 0 \text{ Вт}$$

$$P_\Sigma = P_a + P_b + P_c = 541,5 + 2022,5 = 2564 \text{ Вт}$$

Порядок построения векторной диаграммы.

Задаемся масштабом:

по току: $m_I = 5 \text{ А/см}$

по напряжению: $m_U = 20 \text{ В/см}$

Определим длину векторов напряжения и токов:

$$l_{I_A} = \frac{I_A}{m_I} = \frac{9.5}{5} = 1.9 \text{ см}$$

$$l_{I_B} = \frac{I_B}{m_I} = \frac{15.9}{5} = 3.2 \text{ см}$$

$$l_{I_C} = \frac{I_C}{m_I} = \frac{31.8}{5} = 6.4 \text{ см}$$

$$l_{U_\Phi} = \frac{U_\Phi}{m_U} = \frac{127}{20} = 6,4 \text{ см}$$

Строим диаграмму фазных напряжений, откладывая векторы под углом 120° друг к другу. Вектор тока I_A отстаёт от вектора напряжения U_A на угол $\varphi_a = 63^\circ$, так как нагрузка в этой фазе является активно-индуктивной. Вектор тока I_B совпадает по фазе с U_B , так как нагрузка чисто активная, а вектор тока I_C при чисто ёмкостной нагрузке опережает напряжение U_C на угол $\varphi_c = 90^\circ$.

Ток в нейтральном проводе I_0 определим из векторной диаграммы. Применяя первый закон Кирхгофа, получим уравнение:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$$

Зная масштаб по току, определим численное значение тока I_0 :

$$I_0 = m_I * l_{I_0} = 5 * 10 = 50 \text{ А}$$

$$l_{I_0} = 10 \text{ см}$$

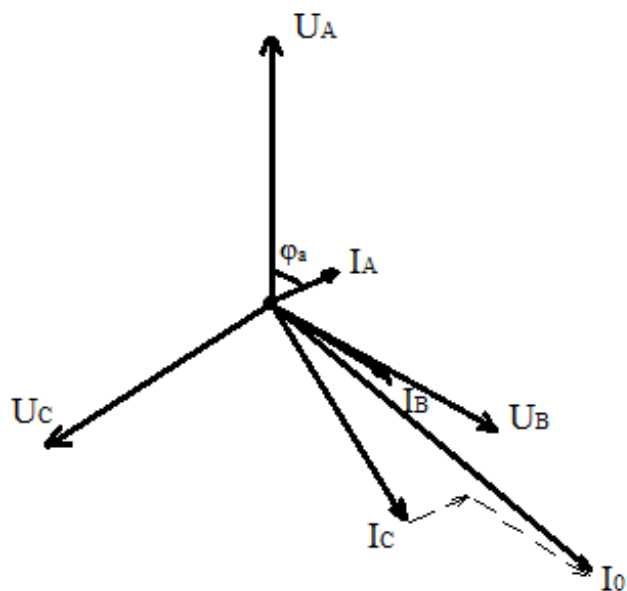
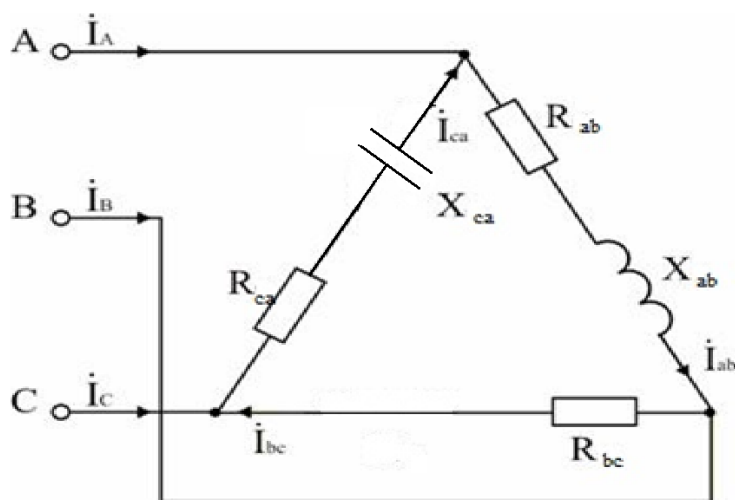


Рис. 13



Задача 3.

Дано:

- $U_{\text{Л}} = 120 \text{ В}$
- $R_{\text{AB}} = 4 \text{ Ом}$
- $X_{\text{AB}} = 3 \text{ Ом}$
- $R_{\text{BC}} = 5 \text{ Ом}$
- $R_{\text{CA}} = 3 \text{ Ом}$
- $X_{\text{CA}} = 4 \text{ Ом}$

Требуется:

- определить фазные и линейные токи;
- рассчитать активную мощность каждой фазы и всей трёхфазной цепи;
- построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение

Для соединения приёмников по схеме «треугольник»:

$$U_{\text{AB}} = U_{\text{BC}} = U_{\text{CA}} = U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}} = 120 \text{ В}$$

Определим фазные сопротивления $Z_{\text{Ф}}$:

$$Z_{\text{ab}} = \sqrt{R_{\text{ab}}^2 + X_{\text{ab}}^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}$$

$$Z_{bc} = R_{bc} = 5 \text{ Ом}$$

$$Z_{ca} = \sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}$$

По закону Ома рассчитаем фазные токи:

$$I_{ab} = \frac{U_{AB}}{Z_{ab}} = \frac{120}{5} = 24 \text{ А} ; I_{bc} = \frac{U_{BC}}{Z_{bc}} = \frac{120}{5} = 24 \text{ А} ; I_{ca} = \frac{U_{CA}}{Z_{ca}} = \frac{120}{5} = 24 \text{ А}$$

Определим углы сдвига векторов фазных токов и напряжений:

$$\begin{aligned} \varphi_{ab} &= \arctg \frac{X_{ab}}{R_{ab}} = \arctg \frac{3}{4} = 37^\circ \\ \varphi_{bc} &= \arctg \frac{X_{bc}}{R_{bc}} = \arctg \frac{0}{5} = 0^\circ \\ \varphi_{ca} &= \arctg \frac{X_{ca}}{R_{ca}} = \arctg \frac{4}{3} = 53^\circ \end{aligned}$$

Активная мощность каждой фазы и всей цепи:

$$\begin{aligned} P_{ab} &= I_{ab}^2 * R_{ab} = 24^2 * 4 = 2304 \text{ Вт} \\ P_{bc} &= I_{bc}^2 * R_{bc} = 24^2 * 5 = 2880 \text{ Вт} \\ P_{ca} &= I_{ca}^2 * R_{ca} = 24^2 * 3 = 1728 \text{ Вт} \\ P &= P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 2304 + 2880 + 1728 = 6912 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Порядок построения векторной диаграммы.

Задаёмся масштабом по току: $m_I = 5 \text{ А/см}$, по напряжению $m_U = 20 \text{ В/см}$.

Определим длину векторов напряжения и токов:

$$\begin{aligned} \ell_{U\phi} &= \frac{U_\phi}{m_U} = \frac{120}{20} = 6 \text{ см} \\ \ell_{I_{ab}} &= \frac{I_{ab}}{m_I} = \frac{24}{5} = 4,8 \text{ см} \\ \ell_{I_{bc}} &= \frac{I_{bc}}{m_I} = \frac{24}{5} = 4,8 \text{ см} \\ \ell_{I_{ca}} &= \frac{I_{ca}}{m_I} = \frac{24}{5} = 4,8 \text{ см} \end{aligned}$$

Строим диаграмму фазных напряжений, откладывая векторы под углом 120° друг к другу.

Вектор тока I_{AB} отстаёт от вектора напряжения U_{AB} на угол $\varphi_{AB} = 37^\circ$, так как нагрузка в этой фазе является активно-индуктивной. Вектор тока I_{BC}

совпадает по фазе с U_{BC} , так как нагрузка чисто активная, а вектор тока I_{ca} опережает вектор U_{ca} на угол $\varphi_{ca} = 53^\circ$ при активно-ёмкостной нагрузке.

Линейные токи определим графически из векторной диаграммы. Применяя первый закон Кирхгофа, получим уравнения, связывающие линейные и фазные токи:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca} \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab} \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}$$

Зная масштаб по току, определим численные значения линейных токов:

$$\begin{aligned} l_{IA} &= 9,4 \text{ см} & I_A &= m_I * l_{IA} = 5 * 9,4 = 47 \text{ А} \\ l_{IB} &= 6,5 \text{ см} & I_B &= m_I * l_{IB} = 5 * 6,5 = 32,5 \text{ А} \\ l_{IC} &= 5,2 \text{ см} & I_C &= m_I * l_{IC} = 5 * 5,2 = 26 \text{ А} \end{aligned}$$

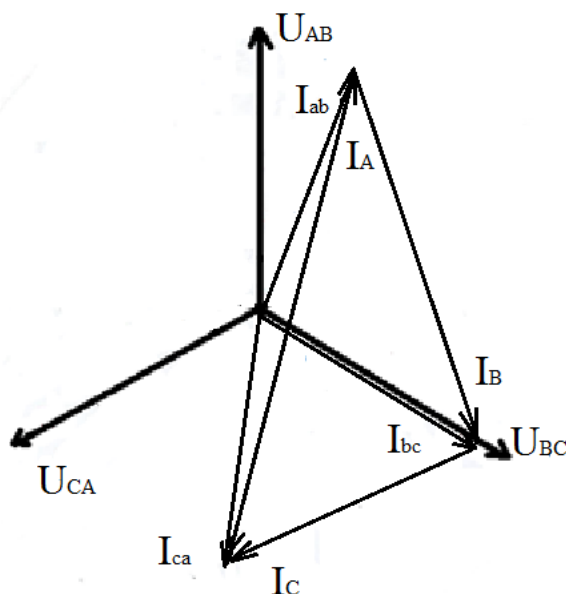
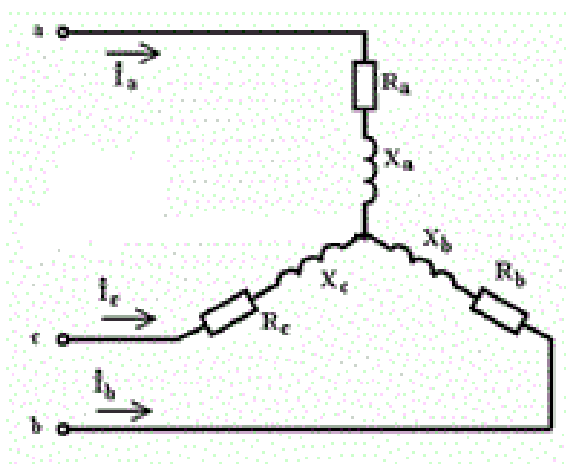


Рис. 14



Задача 4.

Дано:

$$\begin{aligned} U_L &= 380 \text{ В} \\ R_a &= R_b = R_c = 6 \text{ Ом} \\ X_a &= X_b = X_c = 8 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Требуется:

- определить фазные токи;
- рассчитать активную мощность каждой фазы и всей трёхфазной цепи;
- построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение

Расчёт трёхфазной системы при симметричной нагрузке сводится к расчёту одной фазы.

$$R_a = R_b = R_c = R_\phi = 6 \text{ Ом}$$

$$X_a = X_b = X_c = X_\phi = 8 \text{ Ом}$$

Определим фазное напряжение:

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

Определим фазное сопротивление:

$$Z_\phi = \sqrt{R_\phi^2 + X_\phi^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом}$$

По закону Ома рассчитаем фазный ток:

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}$$

Определим сдвиг по фазе между I_ϕ и U_ϕ :

$$\varphi_\phi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi} = \arctg \frac{8}{6} = 53^\circ$$

Активная мощность одной фазы и всей цепи:

$$P_\phi = I_\phi^2 * R_\phi = 22^2 * 6 = 2904 \text{ Вт}$$

$$P = 3 * P_\phi = 3 * 2904 = 8712 \text{ Вт}$$

Порядок построения векторной диаграммы.

Задаёмся масштабом по току: $m_I = 5 \frac{\text{А}}{\text{см}}$

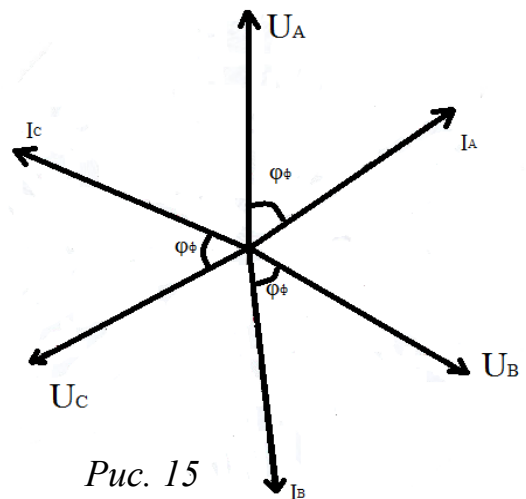
по напряжению $m_U = 40 \text{ В/см}$.

Определим длину векторов напряжения и токов:

$$l_{U_\phi} = \frac{U_\phi}{m_U} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ см}$$

$$l_{I_\phi} = \frac{I_\phi}{m_I} = \frac{22}{5} = 4,4 \text{ см}$$

Строим диаграмму фазных напряжений, откладывая векторы под углом 120° друг к другу. Так как нагрузка симметричная активно-индуктивная, то фазные токи отстают от фазных напряжений на один и тот же угол $\varphi_\phi = 53^\circ$.



5. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электроэнергии переменного тока одного напряжения в электроэнергию переменного тока другого напряжения при условии сохранения частоты и мощности.

Известно, что чем выше напряжение, тем при той же передаваемой мощности будет меньше значение тока, и тем меньше получается требуемое сечение проводов линии электропередачи.

Обычно электростанции располагаются в районе больших запасов угля, нефти, газа или на больших реках, а вырабатываемая ими электроэнергия используется за тысячи километров от электростанции.

Поэтому в месте производства электроэнергии выгодно повышать напряжение до сотен тысяч вольт, затем передавать энергию по проводам в районы потребления, где на понижающих подстанциях напряжение снижается до величин, пригодных для питания электроприёмников.

Современные трансформаторы разнообразны по исполнению и по назначению.

Они могут быть однофазными, трехфазными и многофазными.

Трансформатор имеет не менее двух обмоток, у которых есть общий магнитный поток и которые электрически изолированы друг от друга.

Обмотки размещаются на магнитопроводе, собранном из листовой электротехнической стали для снижения вихревых токов и усиления индуктивной связи.

Обмотка трансформатора, соединенная с источником питания, называется первичной. Соответственно называются первичными все величины, относящиеся к этой обмотке: число витков W_1 , напряжение U_1 , ток I_1 и т.д.

Обмотка, к которой подключён потребитель электроэнергии, называется

вторичной, и все величины, относящиеся к ней – вторичные.

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции.

Рассмотрим принцип действия на примере однофазного двухобмоточного, идеального (пренебрегаем сопротивлениями обмоток и потоками рассеивания) трансформатора (рис. 16)

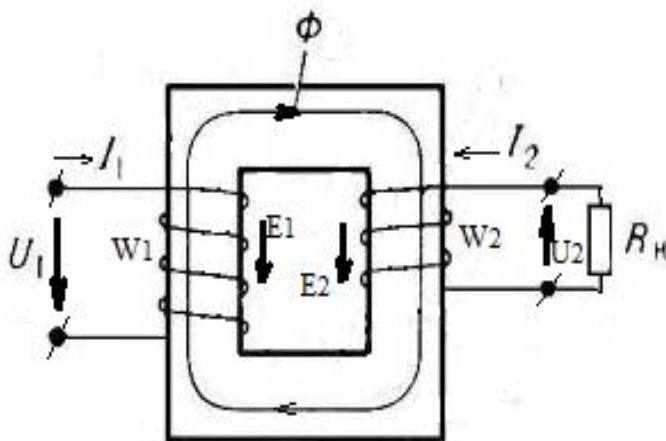


Рис. 16

Предположим, что вторичная обмотка разомкнута, тогда при подаче переменного напряжения U_1 на первичную обмотку, в ней возникнет переменный ток I_1 , который вызовет появление в стальном магнитопроводе переменного магнитного потока Φ .

Этот поток индуцирует э.д.с. E_1 и E_2 в обеих обмотках трансформатора. э.д.с. E_1 уравнивает основную часть напряжения источника U_1 , а E_2 создает напряжение U_2 на разомкнутых выходных зажимах трансформатора.

При замыкании вторичной цепи на нагрузку R_n возникает ток I_2 , который образует собственный поток в магнитопроводе, накладывающийся на поток первичной обмотки.

В результате создается общий основной рабочий магнитный поток, сцепленный с витками обеих обмоток и определяющий в них результирующие э.д.с. E_1 и E_2 .

Действующие значения э.д.с. в обеих обмотках можно определить по формулам:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m, \quad E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_m$$

Коэффициент трансформации определяется как отношение э.д.с. первичной и вторичной обмоток, или отношение их чисел витков:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}$$

Для понижающих трансформаторов $W_1 > W_2$ и $k > 1$

Для повышающих трансформаторов $W_1 < W_2$ и $k < 1$

На предприятии, выпускающем трансформаторы, проводятся заводские испытания в режиме холостого хода и опытным коротком замыкании.

Опыт холостого хода проводят при номинальном напряжении на первичной обмотке и разомкнутой вторичной обмотке.

Так как вторичная обмотка разомкнута, то $I_2 = 0$, а по первичной при $U_{1н}$ идет небольшой ток $I_0 = (3-10) \% I_{1н}$, и потери мощности в первичной обмотке небольшие, а во вторичной их нет вообще. Можно считать, что $P_m = 0$, а значит, все потери мощности при холостом ходе – это потери в стальном сердечнике $P_{ст}$.

Кроме этого, опыт холостого хода позволяет определить:

- коэффициент трансформации: $k = \frac{U_{1н}}{U_{20}}$;

- коэффициент мощности при холостом ходе: $\cos \varphi_0 = \frac{P_{ст}}{U_{1н} \cdot I_0}$;

- угол магнитных потерь (определяется потерями в магнитопроводе): $\delta = 90^\circ - \varphi_0$;

- полное, активное и реактивное сопротивления намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}; \quad R_0 = \frac{P_{ст}}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Опытное короткое замыкание производится при замкнутой накоротко вторичной обмотке и пониженном напряжении, приложенном к первичной обмотке, которое составляет $U_k\%=(5-10)\%U_{1H}$. При этом испытании $I_k=I_{1H}$.

Поскольку U_k мало, то мал и магнитный поток, поэтому малы потери в стали $P_{ст}$, ими можно пренебречь, и значит, все потери мощности – это потери в медных обмотках P_M .

Кроме этого, опытное короткое замыкание позволяет определить :

- коэффициент мощности в режиме короткого замыкания:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_M}{U_k * I_k};$$

- сопротивления обеих обмоток трансформатора

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}; \quad R_2 = \frac{R_2'}{k^2}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{k^2},$$

где R_k и X_k – сопротивления короткого замыкания, которые можно определить по формулам:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}; \quad R_k = \frac{P_M}{I_k^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Если принимать во внимание, что электроэнергия по пути от электростанции к месту использования подвергается 3-4-кратной трансформации, то для сохранения энергии необходимо, чтобы К.П.Д. трансформатора был очень высок.

И К.П.Д. силовых трансформаторов распределительных сетей при больших мощностях достигает 0,995.

Но, несмотря на высокий К.П.Д., в трансформаторе всё же есть потери мощности – постоянные и переменные.

Постоянные потери активной мощности имеют магнитную природу. Составляют из потерь в стальном сердечнике (магнитопроводе) на гистерезис и вихревые токи. Эти потери зависят от магнитного потока (Φ) и частоты (f) и не зависят от нагрузки; определяются из опыта холостого хода $P_0=P_{ст}$.

Переменные потери – потери в меди обмоток. Их природа- электрическая, они зависят от нагрузки, эти потери мощности определяют из опыта короткого замыкания. $P_M=P_K=I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$.

К.П.Д. трансформатора определяется как отношение активной мощности, отдаваемой потребителю на вторичной обмотке трансформатора) к активной мощности, потребляемой трансформатором из сети(на первичной обмотке):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{\text{ст}} + P_{\text{м}})}{P_1} = 1 - \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{м}}}{P_1}$$

Зависимость $\eta = f(\beta)$ имеет выраженный максимум при $\beta_{\text{м}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{м}}}}$.

Это объясняется тем, что с ростом I_2 происходит сильное увеличение потерь в меди обмоток и, как следствие, снижение К.П.Д.

К.П.Д. можно также определить по формуле:

$$\eta = \frac{\beta * S_{\text{н}} * \cos \varphi_2}{\beta * S_{\text{н}} * \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + \beta^2 * P_{\text{м}}}$$

где $S_{\text{н}} = U_{1\text{н}} * I_{1\text{н}}$ – полная мощность трансформатора при номинальной нагрузке.

Если же вторичная цепь замкнута на нагрузку и $I_2 \neq 0$, то можно экспериментально снять внешнюю характеристику

$$U_2 = f(\beta) \quad \text{при } \cos \varphi_2 = \text{const и } U_1 = U_{1\text{н}},$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}}$ – коэффициент нагрузки;

$\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки.

Внешняя характеристика показывает, как изменяется вторичное напряжение U_2 при изменении нагрузки:

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} * 100\%,$$

где U_{20} – вторичное напряжение при холостом ходе.

Обычно $\Delta U_2 \% = (5-10)\% U_{20}$, поэтому силовые трансформаторы проектируют так, чтобы напряжение холостого хода трансформатора было на 5% больше номинального напряжения электроприёмника.

Задача 5.

Для однофазного трансформатора известно:

- мощность $S_{\text{н}} = 100$ кВА;
- напряжение на зажимах первичной обмотки $U_{1\text{н}} = 6000$ В;
- напряжение на зажимах вторичной обмотки $U_{2\text{н}} = 400$ В;
- напряжение короткого замыкания $U_{\text{к}} \% = 5,5\%$;
- мощность короткого замыкания $P_{\text{к}} = 2400$ Вт ;
- мощность холостого хода $P_0 = 600$ Вт ;
- ток холостого хода $I_0 \% = 7\%$;

- коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2=0.8$.

Определить:

- активные и реактивные сопротивления обмоток;
- коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора;
- сопротивления намагничивающей цепи;
- номинальные токи трансформатора;
- К.П.Д. трансформатора при нагрузках 50%, 75%, 100%, 125% от номинальной.

Решение

Определим номинальные токи трансформатора:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}} = \frac{100000}{6000} = 16,67 \text{ A} \quad I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}} = \frac{100000}{400} = 250 \text{ A}$$

Определим ток холостого хода и $\cos\varphi_0$:

$$I_0 = \frac{I_0 \%}{100\%} * I_{1H} = \frac{7\%}{100\%} * 16,67 = 1,17 \text{ A}$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H} * I_0} = \frac{600}{6000 * 1,17} = 0,085$$

Определим сопротивления намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0} = \frac{6000}{1,17} = 5128,2 \text{ Ом}$$

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{600}{1,17^2} = 438,3 \text{ Ом}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5128,2^2 - 438,3^2} = 5109,43 \text{ Ом}$$

Определим сопротивления короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_{K\%} * U_{1H}}{100\% * I_{1H}} = \frac{5,5\% * 6000}{100\% * 16,67} = 19,8 \text{ Ом}$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_{1H}^2} = \frac{2400}{16,67^2} = 8,64 \text{ Ом}$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{19,8^2 - 8,64^2} = 17,82 \text{ Ом}$$

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{6000}{400} = 15$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{8,64}{2} = 4,32 \text{ Ом}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2} = \frac{17,82}{2} = 8,91 \text{ Ом}$$

Сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{K^2} = \frac{4,32}{15^2} = 0,0192 \text{ Ом}$$

$$X_2 = \frac{X'_2}{K^2} = \frac{8,91}{15^2} = 0,0396 \text{ Ом}$$

Определить К.П.Д. трансформатора при различных нагрузках по формуле:

$$\eta = \frac{\beta * S_H * \cos \varphi_2}{\beta * S_H * \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 * P_k}$$

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} - \text{коэффициент нагрузки}$$

Пример расчёта К.П.Д. при нагрузке 50 % от номинальной:

$$\eta = \frac{0,5 * 100000 * 0,8}{0,5 * 100000 * 0,8 + 600 + 0,5^2 * 2400} = 0,9709$$

β	0,5	0,75	1	1,25
η	0,9709	0,9685	0,9639	0,9583

6. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока (двигатели и генераторы) находят широкое применение в различных областях техники. Основное достоинство двигателей постоянного тока заключается в возможности плавного регулирования скорости вращения и получения больших пусковых моментов. По этой причине двигатели постоянного тока широко используются в качестве тяговых двигателей на электротранспорте, а также для привода различного технологического оборудования.

Общим недостатком электрических машин постоянного тока является их конструктивная сложность, связанная главным образом со щёточно-коллекторным аппаратом. Еще одним существенным недостатком является необходимость предварительного преобразования для двигателей постоянного тока электроэнергии переменного тока в электроэнергию постоянного тока.

Основными частями машины постоянного тока (рис. 17) являются статор (6) с магнитными полюсами (2), якорь с обмоткой и коллектором и щёточно-коллекторное устройство.

Статор является механическим остовом машины и одновременно служит для создания основного магнитного поля. Магнитное поле неподвижно, оно возбуждается электромагнитами постоянного тока (1) (реже постоянными магнитами), которые укрепляются на статоре и называются основными полюсами возбуждения.

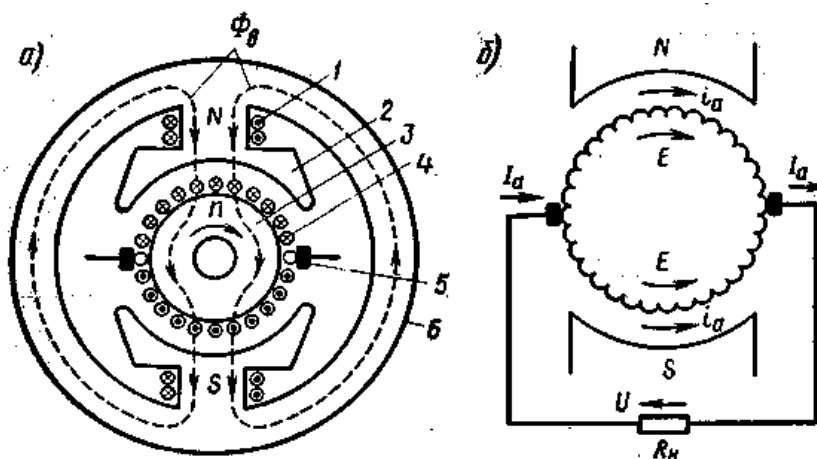


Рис. 17

Якорь состоит из вала (3), стального сердечника, который насаживается на вал, и обмотки якоря (4), которая располагается в пазах сердечника. Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством щёток (5), располагаемых в щеткодержателях.

Коллектор – это полый цилиндр, собранный из изолированных друг от друга и от вала машины клинообразных медных пластин. Пластины коллектора проводниками соединяются с витками обмотки, размещенной в пазах якоря.

Вращающаяся обмотка соединяется с внешней цепью скользящим контактом между щётками и коллектором.

Как и все электрические машины, машина постоянного тока обратима. Она работает в режиме генератора, если её вращает первичный двигатель, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря соединена через щётки с приемником. При таких условиях ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, создает в якоре и приемнике ток. Электродвижущая сила якоря машины постоянного тока:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n,$$

где C_E – постоянная машины, зависит от конструкции;

p – количество полюсов;

Φ – магнитный поток;

n – скорость вращения.

На зажимах генератора возникает напряжение:

$$U = E - I_a \cdot R_a.$$

Напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря.

Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает на валу машины тормозной момент, который преодолевается первичным двигателем. Генератор преобразует механическую энергию в электрическую.

В двигательном режиме цепи якоря и возбуждения машины присоединены к источнику энергии.

Приложенное к зажимам якоря двигателя напряжение уравнивается противо-э.д.с. и падением напряжения на внутреннем сопротивлении якоря:

$$U = E + I_a \cdot R_a.$$

Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает вращающий момент:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_a,$$

где C_M – постоянная машины, зависит от конструкции;

Φ – магнитный поток;

I_a – ток якоря.

Электромагнитный момент МПТ прямо пропорционален току якоря и магнитному потоку полюсов машины.

Под действием электромагнитного момента вращающийся якорь преодолевает момент нагрузки на валу машины. Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую.

Таким образом, одна и та же машина может быть использована в качестве генератора или двигателя.

Важнейшим классификационным признаком машин постоянного тока является способ возбуждения главного магнитного поля. Одним из них является использование постоянных магнитов на полюсах машины, но чаще главное магнитное поле возбуждается с помощью электромагнитов. Для этого используется обмотка возбуждения с током возбуждения, размещенная на сердечниках полюсов машины.

Способ возбуждения – это способ соединения обмотки возбуждения и обмотки якоря между собой.

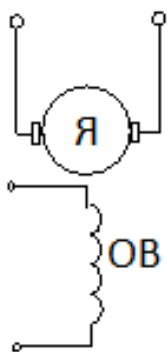


Рис. 18.
Независимое
возбуждение

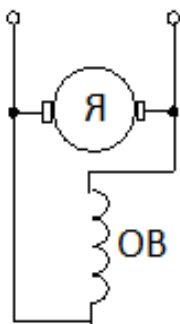


Рис. 19.
Параллельное
возбуждение

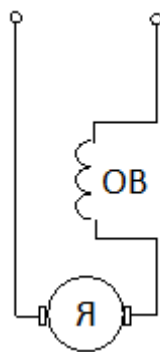


Рис. 20.
Последовательное
возбуждение

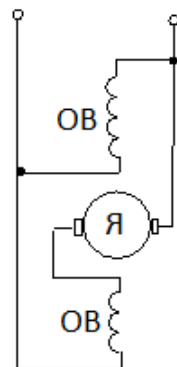


Рис. 21.
Смешанное
возбуждение

В машинах с независимым возбуждением обмотка возбуждения подключается к независимому источнику электроэнергии (рис. 18), благодаря чему ток в ней не зависит от напряжения на выводах якоря машины. Сечение проводов обмотки возбуждения в этих машинах выбирается в зависимости от напряжения источника тока возбуждения. Характерным для этих машин является независимость главного магнитного потока от нагрузки машины.

У машин с параллельным возбуждением (рис. 19) цепь обмотки возбуждения соединяется параллельно с цепью якоря. В этом случае ток возбуждения I_B во много раз меньше тока якоря (0,05 – 0,01), а напряжение U между выводами цепей якоря и возбуждения одно и то же. Следовательно, сопротивление обмотки возбуждения ($r_B = U/I_B$) должно быть относительно велико. Обмотка возбуждения машины параллельного возбуждения имеет большое число витков $W_{\text{пар}}$ из тонкого провода и благодаря этому обладает значительным сопротивлением. Характерно для машин параллельного возбуждения, ра-

ботающих в системе большой мощности, постоянство главного магнитного потока и его небольшая зависимость от условий нагрузки машины.

У машин с последовательным возбуждением ток якоря $I_{\text{я}}$ равен току обмотки возбуждения (рис. 20), поэтому она выполняется проводом большого сечения. Значение тока $I_{\text{я}}$ в обмотке последовательного возбуждения велико, благодаря чему для получения необходимой МДС ($I_{\text{я}} * W_{\text{пос}}$) достаточно, чтобы эта обмотка имела малое число витков $W_{\text{пос}}$. Следовательно, сопротивление обмотки последовательного возбуждения $r_{\text{в}}$ относительно мало. Для этих машин характерны изменения в широких пределах главного магнитного потока при изменениях нагрузки машины вследствие изменений тока якоря, который является одновременно и током возбуждения.

В машинах со смешанным возбуждением на каждом полюсном сердечнике расположены две обмотки (рис. 21).

Одна из этих обмоток, подключаемая параллельно якорю, является основной. Создаваемая ею МДС ($I_{\text{пар}} * W_{\text{пар}}$) возбуждает главное магнитное поле.

Вторая обмотка $W_{\text{пос}}$ лишь дополнительно воздействует на это магнитное поле. В зависимости от преобладания МДС, созданных последовательной или параллельной обмоткой возбуждения, машина по своим характеристикам может быть машиной последовательного возбуждения с небольшой параллельной обмоткой возбуждения или машиной параллельного возбуждения с небольшой последовательной обмоткой возбуждения. В большинстве машин смешанного возбуждения применяется согласное соединение, т.е. МДС двух обмоток складываются. Встречное соединение, при котором МДС обмоток имеют противоположное направление, применяется в немногих специальных случаях.

Вопросы для самопроверки:

1. Объясните устройство машины постоянного тока.
2. Объясните принцип работы машины постоянного тока в качестве генератора и двигателя.
3. Объясните назначение и устройство щеточно-коллекторного узла.
4. Поясните, от каких величин зависит ЭДС обмотки якоря.
5. Объясните, от каких величин зависит вращающий момент двигателя постоянного тока.
6. Сформулируйте условия самовозбуждения генератора постоянного тока.
7. Напишите уравнение электрического состояния для генератора и двигателя.

8. Объясните, как повлияет на частоту вращения, величину противо-ЭДС и ток якоря двигателя независимого возбуждения уменьшение тормозного момента на валу.
9. Изобразите график тока якоря двигателя независимого возбуждения от момента на валу. Как изменится график при введении регулировочного реостата в цепь якоря? в цепь возбуждения?
10. Объясните, какие существуют способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока и укажите их преимущества и недостатки.
11. Поясните, какие двигатели постоянного тока применяются в станках и крановых механизмах.

Задача 6.

Номинальные данные двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

- Мощность $P_H = 3,7$ кВт;
- Напряжение $U_H = 220$ В;
- Число оборотов $n_H = 1025$ об/мин;
- Ток $I_H = 20,5$ А;
- Сопротивления обмоток: $R_{\text{я}} = 0,75$ Ом; $R_{\text{в}} = 258$ Ом.

Определить:

- Вращающий момент двигателя при номинальном режиме и при пуске с пусковым реостатом;
- Сопротивление пускового реостата, если пусковой ток равен $2 I_{\text{ян}}$;
- Частоту вращения якоря двигателя при холостом ходе и построить естественную механическую характеристику.

Решение

Определим ток возбуждения:

$$I_{\text{вн}} = \frac{U_H}{R_{\text{в}}} = \frac{220}{258} = 0,85 \text{ А}$$

Определим ток якоря:

$$I_{\text{ян}} = I_H - I_{\text{вн}} = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ А}$$

Номинальный вращающий момент:

$$M_H = \frac{9550 * P_H}{n_H} = \frac{9550 * 3,7}{1025} = 34,5 \text{ нм}$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства:

$$I_{\text{п}} = 2I_{\text{ян}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}, \text{ откуда}$$

$$R_{\text{п}} = \frac{U_{\text{н}}}{2I_{\text{ян}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2 * 19,65} - 0,75 = 4,85 \text{ Ом}$$

Определим вращающий момент при пуске с пусковым реостатом:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} * \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ян}}} = 34,5 * 2 = 69 \text{ нм}$$

Естественная механическая характеристика $\Omega = f(M)$ (прямая линия) строится по двум точкам:

1) в режиме холостого хода при $M=0$ частота вращения

$$n_0 = \frac{U_{\text{н}} * n_{\text{н}}}{U_{\text{н}} - R_{\text{я}} * I_{\text{ян}}} = \frac{220 * 1025}{220 - 0,75 * 19,65} = 1098,6 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

$$\Omega_0 = \frac{\pi * n_0}{30} = \frac{3,14 * 1098,6}{30} = 115 \frac{1}{\text{с}}$$

2) при номинальной нагрузке $M=M_{\text{н}}$ угловая частота вращения якоря

$$\Omega_{\text{н}} = \frac{\pi * n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 * 1025}{30} = 107 \frac{1}{\text{с}}$$

Построим естественную механическую характеристику.

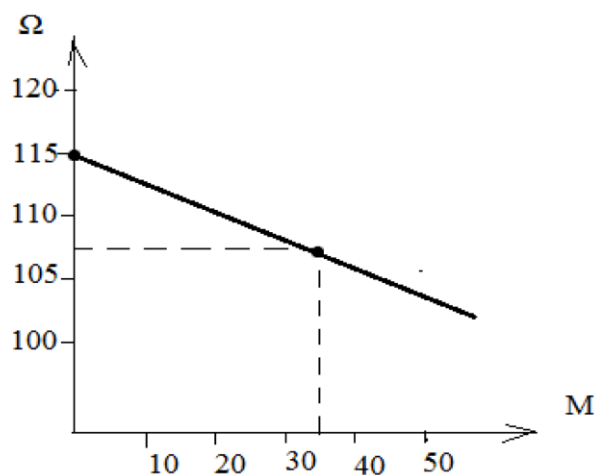


Рис. 22

7. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Асинхронные машины – это машины переменного тока, в которых при работе возбуждается вращающееся магнитное поле, но ротор вращается асинхронно, то есть с угловой скоростью, отличной от угловой скорости магнитного поля.

Асинхронная машина получила широкое распространение в качестве двигателя.

Асинхронный двигатель характеризуется простотой конструкции, высокой надёжностью в эксплуатации, дешёвизной и хорошими механическими характеристиками.

Общий недостаток – относительная сложность и неэкономичность регулирования эксплуатационных характеристик.

Асинхронный двигатель состоит из двух частей: неподвижной – статора и вращающейся – ротора.

В пазах статора размещается трехфазная обмотка, получающая питание от трехфазной системы переменных токов. Эта обмотка намотана таким образом, что трехфазный намагничивающий ток создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения магнитного поля, называемая синхронной, определяется по формуле:

$$n_0 = 60f/p,$$

где f – частота приложенного напряжения, Гц; p – число пар полюсов.

Чтобы изменить направление вращения магнитного потока, достаточно поменять местами подключение двух фаз статора.

На роторе также размещается обмотка, которая в короткозамкнутом двигателе замыкается непосредственно на себя, образуя «беличью клетку».

Вращающийся магнитный поток статора пересекает стержни обмотки ротора и в них индуцируется ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки. Эта ЭДС создает в обмотке ротора ток, который, взаимодействуя с вращающимся магнитным потоком статора, обуславливает образование крутящего момента, действующего на обмотку ротора, направление которого определяется по правилу левой руки.

Недостатками асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором являются: малый пусковой момент $M_{\text{пуск}}$, который в двигателях нормального исполнения составляет 0,5-0,7 от номинального крутящего момента M_n , и значительный пусковой ток I_p , в 5-8 раз превышающий номинальный ток I_n .

Характерным параметром асинхронного двигателя является скольжение s , определяемое выражением:

$$S=(n_0 - n)/ n_0,$$

где n – действительная частота вращения двигателя.

При номинальной частоте вращения n_n , имеющей место при номинальном крутящем моменте M_n , скольжение будет также номинальным:

$$S_n=(n_0 - n_n)/ n_0.$$

Промышленностью выпускаются специальные крановые двигатели, имеющие пониженные пусковые токи, у которых пусковой крутящий момент приближается к критическому. Эти двигатели имеют повышенное номинальное скольжение, а следовательно, пониженный коэффициент мощности и коэффициент полезного действия.

Важнейшей технической характеристикой асинхронного двигателя является его номинальная мощность – это полезная мощность, на которую рассчитан двигатель по условиям нагрева и длительной безаварийной работы.

Все величины, соответствующие номинальному режиму работы двигателя, называются номинальными и указываются в паспортных данных двигателя. К ним относятся: тип двигателя, полезная мощность на валу P_n , скорость вращения ротора n_n , коэффициент полезного действия η_n , коэффициент мощности $\cos\varphi_n$, линейное напряжение U_n , частота тока f , схема соединения статорных обмоток, режим работы и другие сведения.

В каталогах и технических справочниках по асинхронным двигателям значения пускового и критического моментов заданы в виде отношений этих величин к номинальному моменту двигателя:

$$M_{\text{пуск}}/ M_n \text{ и } M_{\text{max}}/ M_n = \lambda.$$

Для нахождения числовых значений $M_{\text{пуск}}$ и M_{max} предварительно определяют номинальный момент двигателя M_n (Н·м) по его номинальной мощности P_n (кВт) и номинальной частоте вращения n_n (об/мин):

$$M_n=9550 P_n/ n_n.$$

По известным из каталога значениям λ , P_n , и n_n можно построить механическую характеристику асинхронного двигателя. Расчет получается особенно простым, если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора. Покажем путь решения этой задачи. Для построения механической характеристики $M(s)$ двигателя используют формулу:

$$M = \frac{2 M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}$$

Предварительно находят значения $s_{\text{кр}}$, применяя расчетную формулу для номинального режима двигателя:

$$S_{кр} = S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

Зная значения M_{max} и $S_{кр}$ и используя расчетную формулу, можно для любого значения S найти соответствующий момент M и построить кривую $M(s)$ (рис. 23).

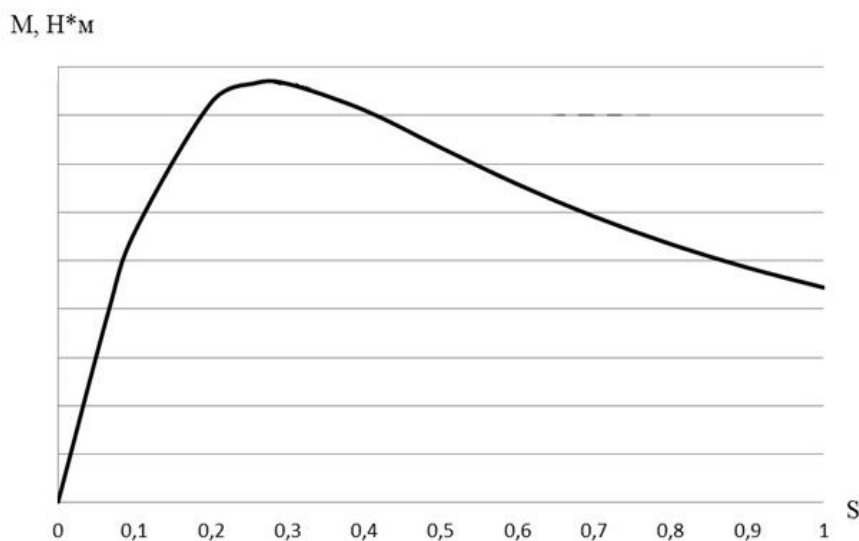


Рис. 23

Значения пускового и максимального моментов асинхронного двигателя являются важными для оценки его механических свойств. По значению пускового момента двигателя устанавливают возможность пуска электропривода (агрегата двигатель – рабочий механизм). Для этого должно быть выполнено условие $M_{пуск} > M_{с.нач.}$, где $M_{с.нач.}$ – момент статического сопротивления производственного механизма в момент пуска.

По значению максимального момента M_{max} двигателя можно судить о его кратковременной перегрузочной способности. По перегрузочной способности двигатель подходит, если выполняется неравенство:

$$0,9M_{max} \geq M_{с.м.},$$

где $M_{с.м.}$ – максимальный статический момент сопротивления нагрузки.

Для асинхронных двигателей нормального исполнения $\lambda = 1,6 \div 2,5$.

Вращающий момент асинхронного двигателя при заданном скольжении прямо пропорционален квадрату напряжения. В связи с этим понижение напряжения в электрической сети, питающей двигатель, отрицательно сказывается на его работе. Резкое снижение пускового и максимального моментов затрудняет, а иногда делает невозможным пуск тяжелых производственных машин и снижает допускаемые кратковременные перегрузки двигателя.

Повышение напряжения ($U > U_n$) вызывает увеличение реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем, поэтому оно также нежелательно.

В связи с этим Правилами устройства электроустановок отклонения напряжения на зажимах электродвигателей от номинального допускаются в пределах $\pm 5\%$.

Задача 7.

Даны номинальные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

- мощность $P_n = 11$ кВт;
- скорость вращения $n_n = 975$ об/мин;
- перегрузочная способность $\frac{M_{\max}}{M_n} = 2$;
- число пар полюсов $p = 3$.

Требуется:

- построить механическую характеристику $M = f(S)$ при номинальном напряжении;
- определить скорость вращения двигателя при моменте нагрузки $M_{\text{нГ}} = 160$ н.м.;
- определить возможность пуска двигателя, если момент сопротивления производственного механизма, приводимого в действие двигателем, $M_{\text{с.нач}} = 20$ н.м.;
- установить возможность работы двигателя при наличии мгновенных перегрузок $M_{\text{с.м}} = 200$ н.м.

Решение

Определим номинальный момент двигателя:

$$M_n = \frac{9550 * P_n}{n_n} = \frac{9550 * 11}{975} = 107,7 \text{ нм}$$

Максимальный момент двигателя:

$$M_{\max} = M_n * \frac{M_{\max}}{M_n} = 107,7 * 2 = 215,48 \text{ нм}$$

Определим скорость вращения магнитного поля при частоте $f = 50$ Гц

$$n_0 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{3} = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Номинальное и критическое скольжение:

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0,025$$

$$S_{кр} = S_H * \left(\frac{M_{max}}{M_H} + \sqrt{\left(\frac{M_{max}}{M_H} \right)^2 - 1} \right) = 0,025 * \left(2 + \sqrt{2^2 - 1} \right) = 0,093$$

Механическая характеристика $M=f(S)$ строится по упрощённой формуле Клосса

$$M = \frac{2 M_{max}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}} = \frac{2 * 215,18}{\frac{0,093}{S} + \frac{S}{0,093}} \text{ нм}$$

Задаваясь скольжением от 0 до 1, определяем вращающий момент и строим механическую характеристику

S	0	$S_H=0,025$	$S_{кр}=0,093$	0,5	0,7	1
M	0	107,74	215,48	74,83	55,55	22,86

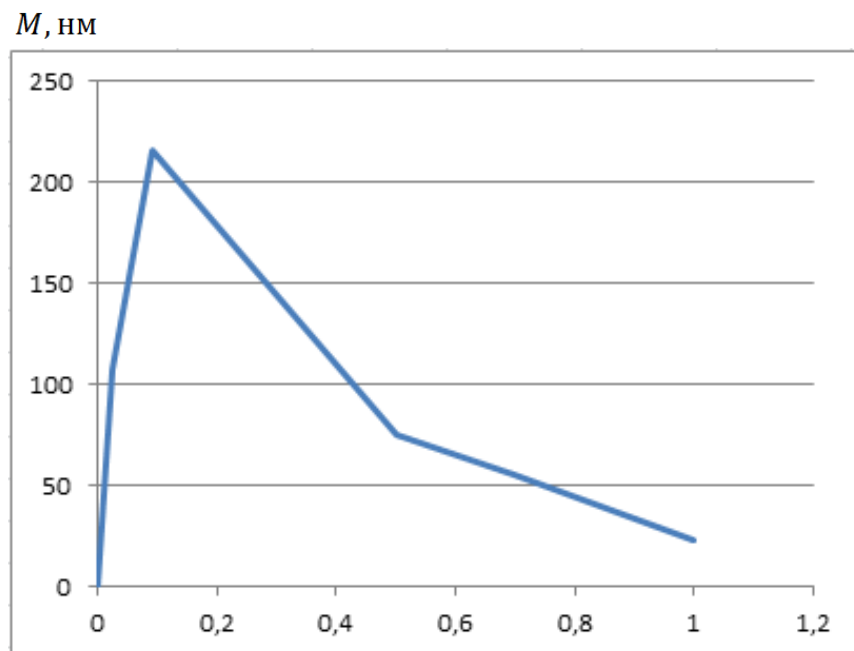


Рис. 24

S

Для $M_{нг}=160$ н.м. по графику определить скольжение: $S^*=0.05$ и скорость вращения двигателя:

$$n=n_0(1-S) = 1000(1-0,05) = 950 \text{ об/мин}$$

Пуск двигателя возможен при условии:

$M_p > M_{с.нач.}$

Пусковой момент M_p определим по таблице при $S=1$: $M_p=22,86$ н.м.

$22,86 > 20$

Пуск двигателя возможен.

При наличии мгновенных перегрузок работа двигателя возможна при условии:

$0,9M_{max} \geq M_{с.м}$

$0,9 \cdot 215,48 < 200$

$193,9 < 200$

По перегрузочной способности двигатель не проходит.

8. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Устройство и расчёт электрических сетей – один из наиболее значимых в практическом отношении вопросов.

Рассчитать электрическую линию – значит, определить сечение провода, которое обеспечивало бы нормальную работу электроприёмников, питаемых этой линией. Сечение проводов рассчитывают по двум условиям – нагреву и отклонению напряжения. Выбор сечения проводов по условиям нагрева с помощью таблиц заключается в сравнении длительно допустимого тока для данного сечения провода, взятого из таблиц, с расчётным значением тока. При этом должно соблюдаться условие: $I_{доп.} \geq I_{расч.}$, где $I_{доп.}$ – длительно допустимый ток по условиям нагрева; $I_{расч.}$ – расчётное значение тока.

При изменении нагрузки происходит колебание напряжения у потребителя. Допустимые отклонения напряжения в процентах от номинального напряжения сети составляют:

а) на зажимах приборов рабочего освещения в производственных и общественных помещениях 2,5 %;

б) на зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления 5%.

В общем виде формула для определения потери напряжения в линии:

$$\Delta U\% = \frac{PL}{CS},$$

где P – нагрузка, кВт; L – длина линии, м; S – сечение провода, мм².

Основными причинами аварийных режимов электроустановок являются короткие замыкания и перегрузки. Для защиты электроустановок от ненормальных режимов работы применяют защитные аппараты- предохранители.

Ток плавкой вставки предохранителя, служащего для защиты проводов от токов короткого замыкания, должен удовлетворять соотношению:

$$\frac{I_{\text{ном.пл.вст.}}}{I_{\text{доп.}}} \leq 3,$$

где $I_{\text{ном.пл.вст.}}$ – номинальный ток плавкой вставки;

$I_{\text{доп.}}$ – допустимый ток по условиям нагрева для защищаемого провода.

Плавкую вставку для защиты одиночного короткозамкнутого асинхронного электродвигателя выбирают по условию:

$$I_{\text{ном.пл.вст.}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{\alpha},$$

где $I_{\text{пуск.}}$ – пусковой ток электродвигателя;

α – коэффициент кратковременной перегрузки плавкой вставки.

$\alpha=2,5$ – для двигателей, пускаемых под нагрузкой;

$\alpha=1,6$ – для двигателей с тяжёлым пуском.

Пусковой ток асинхронного короткозамкнутого электродвигателя определяют по формуле:

$$I_{\text{пуск.}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном.}},$$

где $K_{\text{п}}$ – кратность пускового тока (определяется по каталогу);

$I_{\text{ном.}}$ – номинальный ток электродвигателя.

Порядок выбора сечений проводов и плавких вставок для защиты проводов от действия токов короткого замыкания для сечений, питающих электродвигатели, следующий:

- а) определить расчётный ток двигателя;
- б) по расчётному току выбрать сечение проводов по условиям нагрева;
- в) проверить выбранное сечение по потере напряжения;
- г) определить пусковой ток электродвигателя;
- д) по пусковому току выбрать плавкую вставку предохранителя;
- е) проверить, защищает ли выбранная плавкая вставка сечение проводов от действия токов короткого замыкания.

Контрольные вопросы.

1. По каким двум критериям рассчитывают электрические линии?
2. В чём сущность расчёта сечения проводов по условиям нагрева?
3. Какие формулы могут быть использованы для определения потери напряжения?
4. Как защитить электроустановки от аварийных режимов работы?
5. Как проверить правильность выбора защиты?

9. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача №1

Для электрической цепи, схема которой изображена на с. 52, по заданным в табл.1 параметрам определить показания измерительных приборов, реактивную мощность цепи, построить векторную диаграмму. Ток в неразветвленной части цепи рекомендуется определить по векторной диаграмме.

Задача №2

Для трехфазной цепи, схема которой изображена на с. 53-54, по заданным в табл.2 параметрам и линейному напряжению определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе, (для четырехпроводной схемы), активную мощность всей цепи и каждой фазы в отдельности. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы) и линейные токи (для соединения “треугольником”) рекомендуется определить по векторной диаграмме.

Задача №3

Для однофазного трансформатора мощностью S_n напряжением U_{H1}/U_{H2} известны: мощность потерь холостого хода P_0 , потери короткого замыкания при номинальной нагрузке P_k , ток холостого хода в процентах от номинального I_0 , напряжение короткого замыкания U_k в процентах от номинального. Пользуясь данными таблицы 3, определить активные и реактивные сопротивления обмоток, считая, что сопротивления первичной и вторичной приведенной обмоток равны. Вычислить коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора, определить активные и реактивные сопротивления магнитопровода. Определить номинальные токи трансформатора и к.п.д. трансформатора при нагрузках 50, 75, 100, 125 процентов от номинальной. Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0.8$.

Задача №4

Известны номинальные данные двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: мощность P_n , напряжение U_n , число оборотов n_n и ток I_n .

Кроме того, известны сопротивления обмоток якоря и дополнительных полюсов в нагретом состоянии $R_{\text{я}}$ и обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$ (табл. 4).

Определить:

вращающий момент двигателя при номинальном режиме и при пуске с пусковым реостатом;

сопротивление пускового реостата, если пусковой ток равен $2I_{\text{ян}}$;

частоту вращения якоря двигателя при холостом ходе и построить естественную механическую характеристику. Размагничивающим действием якоря пренебречь.

Задача №5

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие данные: $P_{\text{н}}$, $n_{\text{н}}$, $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$, ρ (табл.5).

Требуется:

1) построить механическую характеристику $M = f(S)$ при номинальном напряжении;

2) определить частоту вращения двигателя при моменте нагрузки $M_{\text{нг}}$;

3) определить возможность пуска двигателя, если момент сопротивления производственного механизма, приводимого в действие двигателем, $M_{\text{с.нач.}}$;

4) установить возможность работы двигателя при наличии мгновенных перегрузок $M_{\text{с.м}}$.

Таблица 1

Номера		U	R_1	R_2	X_{C1}	X_{C2}	$X_{1,1}$	$X_{1,2}$
вариантов	рисунков	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	1	127	5	3	-	4	-	-
2	2	100	10	13	-	-	-	4
3	3	127	-	8	2	6	-	-
4	4	200	-	16	-	12	10	-
5	5	80	-	16	32	-	-	12
6	6	100	-	6	-	-	3	8
7	7	200	-	-	20	-	-	40
8	8	80	24	16	12	-	-	32
9	1	220	10	6	-	9	-	-
10	2	150	25	12	-	-	-	5
11	3	220	-	12	4	8	-	-
12	4	120	-	32	-	24	40	-
13	5	130	-	8	16	-	-	10
14	6	80	-	3	-	-	8	4
15	7	150	-	-	15	-	-	20
16	8	120	12	8	10	-	-	16
17	1	380	15	8	-	10	-	-
18	2	200	20	11	-	-	-	6

Окончание табл. 1

19	3	380	-	18	8	3	-	-
20	4	400	-	48	-	64	60	-
21	5	100	-	8	4	-	-	6
22	6	160	-	12	-	-	6	16
23	7	120	-	-	12	-	-	20
24	8	80	3	8	6	-	-	4
25	1	127	10	12	-	8	-	4
26	2	2502	5	10	-	-	-	7
27	3	220	-	15	7,5	9	-	-
28	4	120	-	6	-	8	12	-
29	5	200	-	16	24	-	-	12
30	6	120	-	3	-	-	12	4
31	7	180	-	-	18	-	-	12
32	8	220	32	16	12	-	-	24
33	1	220	5	14	-	10	-	-
34	2	300	30	9	-	-	-	8
35	3	380	-	10	6	9	-	-
36	4	120	-	8	-	6	8	-
37	5	80	-	6	3	-	-	8
38	6	200	-	12	-	-	32	16
39	7	120	-	-	16	-	-	9
40	8	100	4	6	8	-	-	3
41	1	380	20	16	-	20	-	-
42	2	350	35	8	-	-	-	9
43	3	127	-	15	8	10	-	-
44	4	400	-	32	-	24	25	-
45	5	100	-	6	6	-	-	8
46	6	300	-	32	-	-	12	24
47	7	220	-	-	22	-	-	16
48	8	400	64	24	32	-	-	48
49	1	127	8	2	-	6	-	-
50	2	400	40	7	-	-	-	10

Таблица 2

Номера		Ул	R _a	R _b	R _c	X _a	X _b	X _c	R _{ab}	R _{bc}	R _{ca}	X _a b	X _b c	X _c a
вариан- тов	рисун- ков	В	О м	О м	О м	О м	О м	О м	О м	О м	О м	О м	О м	О м
0	1	12 7	8	8	8	6	6	6	-	-	-	-	-	-
1	2	22 0	4	4	4	6	6	6	-	-	-	-	-	-
2	3	38 0	3	4	6	4	3	8	-	-	-	-	-	-
3	4	12 7	4	8	10	3	4	8	-	-	-	-	-	-
4	5	22 0	3	-	-	-	4	8	-	-	-	-	-	-
5	6	38 0	-	4	4	3	6	-	-	-	-	-	-	-

6	7	12 7	20	8	-	6	-	10	-	-	-	-	-	-
7	8	22 0	4	3	6	5	5	-	-	-	-	-	-	-
8	9	38 0	6	8	6	-	8	8	-	-	-	-	-	-

Окончание табл. 2

9	10	127	-	-	-	-	-	-	8	6	4	6	-	3
10	11	220	-	-	-	-	-	-	3	8	-	-	10	6
11	12	380	-	-	-	-	-	-	8	-	-	6	4	3
12	13	127	-	-	-	-	-	-	-	8	4	10	6	3
13	14	220	-	-	-	-	-	-	-	4	3	20	3	4
14	15	380	-	-	-	-	-	-	3	-	5	8	4	6
15	16	127	-	-	-	-	-	-	-	4	4	3	6	-
16	1	220	6	6	6	8	8	8	-	-	-	-	-	-
17	2	380	2	2	2	4	4	4	-	-	-	-	-	-
18	3	127	8	4	6	6	3	8	-	-	-	-	-	-
19	4	220	6	12	16	6	8	16	-	-	-	-	-	-
20	5	380	4	-	-	-	8	10	-	-	-	-	-	-
21	6	127	-	3	4	8	10	-	-	-	-	-	-	-
22	7	220	6	8	-	10	-	6	-	-	-	-	-	-
23	8	380	8	4	6	8	4	-	-	-	-	-	-	-
24	9	127	8	6	8	-	6	6	-	-	-	-	-	-
25	10	220	-	-	-	-	-	-	3	8	6	4	-	8
26	11	380	-	-	-	-	-	-	4	6	-	-	6	4
27	12	127	-	-	-	-	-	-	6	-	-	12	8	4
28	13	220	-	-	-	-	-	-	-	8	3	10	6	4
29	14	380	-	-	-	-	-	-	-	8	6	10	6	8
30	15	127	-	-	-	-	-	-	8	-	6	4	4	6
31	16	220	-	-	-	-	-	-	-	6	8	4	3	-
32	1	380	3	3	3	4	4	4	-	-	-	-	-	-
33	2	127	5	5	5	9	9	9	-	-	-	-	-	-
34	3	220	4	3	6	3	4	8	-	-	-	-	-	-
35	4	380	5	9	12	5	6	10	-	-	-	-	-	-
36	5	127	4	-	-	-	3	6	-	-	-	-	-	-
37	6	220	-	5	5	10	6	-	-	-	-	-	-	-
38	7	380	6	8	-	12	-	4	-	-	-	-	-	-
39	8	127	4	3	8	6	3	-	-	-	-	-	-	-
40	9	220	3	4	4	-	4	4	-	-	-	-	-	-
41	10	380	-	-	-	-	-	-	8	6	3	6	-	4
42	11	127	-	-	-	-	-	-	8	10	-	-	12	4
43	12	220	-	-	-	-	-	-	4	-	-	4	6	6
44	13	380	-	-	-	-	-	-	-	3	8	20	4	6
45	14	127	-	-	-	-	-	-	-	8	3	10	6	4
46	15	220	-	-	-	-	-	-	8	-	4	10	6	6
47	16	380	-	-	-	-	-	-	-	9	12	10	4	-
48	1	127	4	4	4	3	3	3	-	-	-	-	-	-
49	2	220	12	12	12	6	6	6	-	-	-	-	-	-
50	3	380	8	6	4	6	8	3	-	-	-	-	-	-

Таблица 3

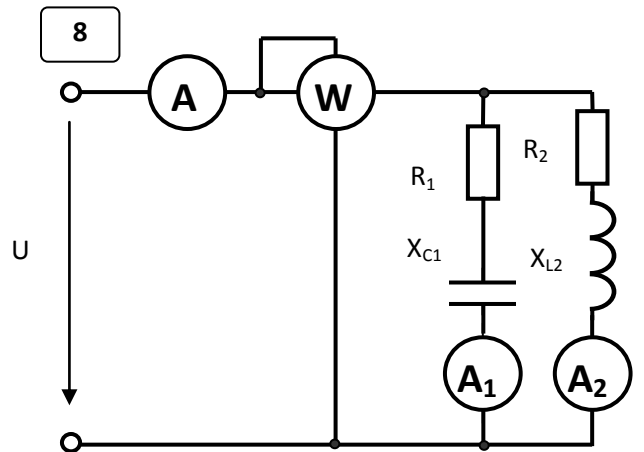
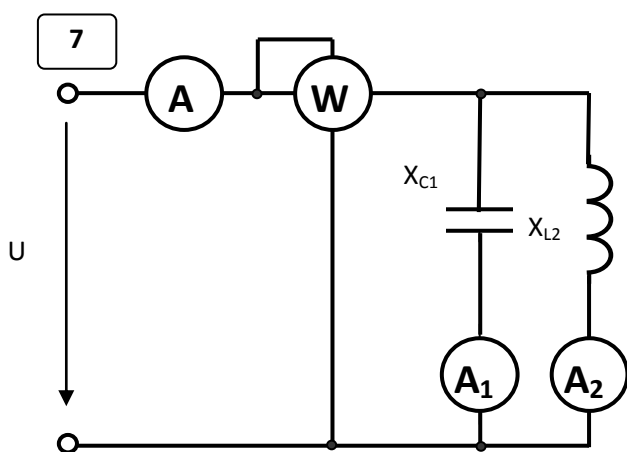
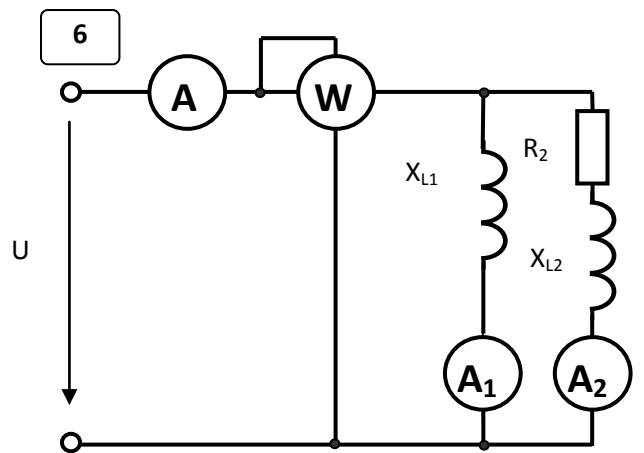
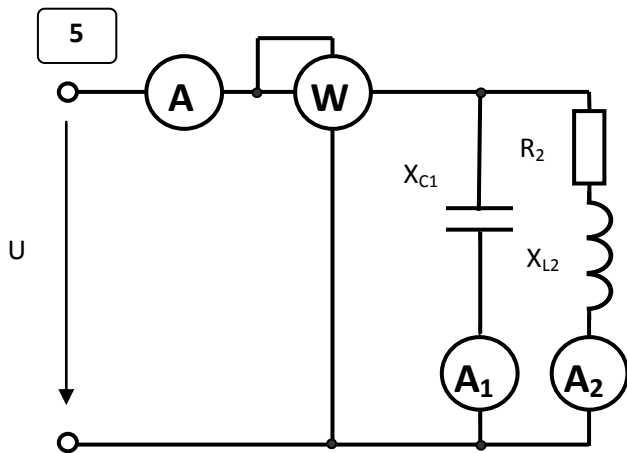
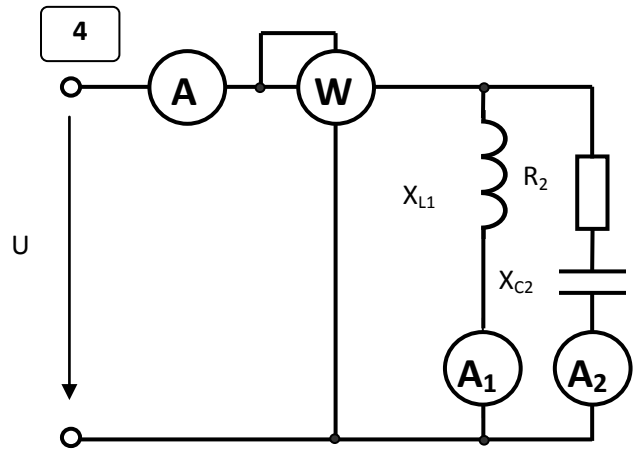
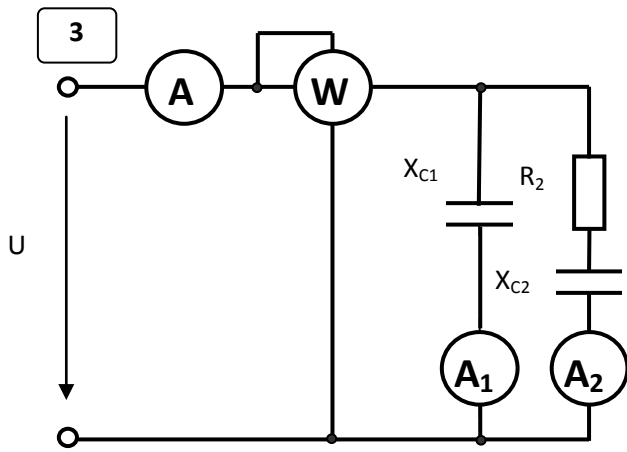
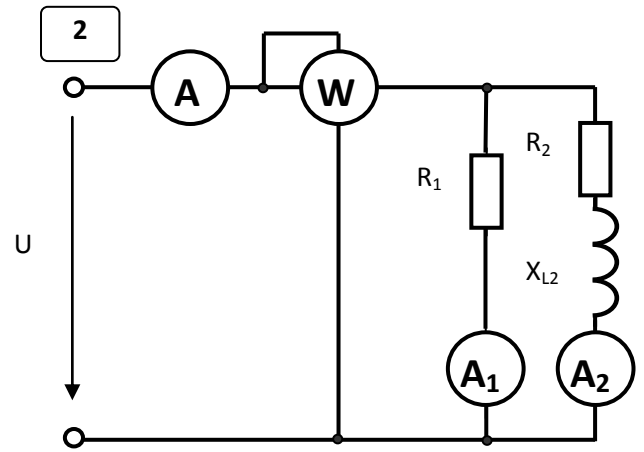
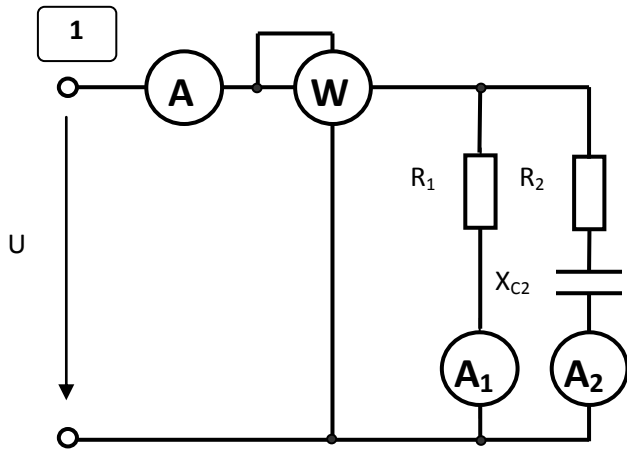
№ вар.	S_H	U_{H1}	U_{H2}	U_K	P_K	P_0	I_0
	кВА	В	В	%	Вт	Вт	%
1	20	6300	230	5.0	600	180	9.0
2	30	10000	400	5.0	850	300	8.0
3	50	10000	400	5.0	1325	440	8.0
4	75	10000	230	5.0	1875	590	7.5
5	100	10000	525	5.0	2400	730	7.5
6	180	10000	525	5.0	4100	1200	7.0
7	240	10000	525	5.0	5100	1600	7.0
8	320	35000	10500	6.5	6200	2300	7.5
9	420	10000	525	5.5	7000	2100	6.6
10	25	6000	230	4.5	600	125	3.0
11	25	10000	230	4.7	690	125	3.0
12	25	60000	400	4.5	600	125	3.0
13	25	10000	400	4.7	690	125	3.0
14	40	10000	230	4.5	880	180	3.0
15	40	6000	230	4.5	880	180	3.0
16	40	6000	400	4.7	1000	180	3.0
17	40	10000	400	4.0	690	125	3.2
18	63	6000	230	4.5	1280	260	2.8
19	63	6000	400	4.5	1280	260	2.8
20	63	10000	230	4.7	1470	260	2.8
21	63	10000	400	4.7	1470	260	2.8
22	63	2000	400	4.7	1470	260	2.8
23	63	20000	230	4.7	1470	260	2.8
24	63	2000	400	4.5	1280	260	2.8
25	100	10000	230	4.7	2270	365	2.6
26	100	10000	400	4.7	2270	365	2.6
27	100	6000	230	4.5	1970	365	2.6
28	100	6000	400	4.5	1970	365	2.6
29	100	20000	230	4.7	2270	465	2.6
30	100	20000	400	4.7	2270	465	2.6
31	100	35000	230	4.7	2270	465	2.6
32	100	35000	400	4.7	2270	465	2.6
33	160	6000	230	4.5	2650	540	2.4
34	160	6000	400	4.5	2650	540	2.4
35	160	10000	230	4.5	3100	540	2.4
36	160	10000	400	4.5	3100	540	2.4
37	160	6000	690	4.5	2650	540	2.4
38	250	6000	230	4.5	3700	780	2.3
39	250	6000	400	4.5	3700	780	2.3
40	250	10000	230	4.7	4200	780	2.3
41	250	10000	690	4.7	4200	780	2.3
42	400	3000	400	4.5	5500	1080	3.2
43	400	6000	400	4.5	5500	1080	3.2
44	400	6000	690	4.5	5500	1080	3.2
45	400	6300	400	4.5	5500	1080	3.2
46	400	10000	230	4.5	5500	1080	3.2
47	400	10000	400	4.5	5500	1080	3.2
48	400	10000	690	4.5	5500	1080	3.2
49	630	3000	400	5.0	7600	1680	3.2
50	630	6000	400	5.0	7600	1680	3.2

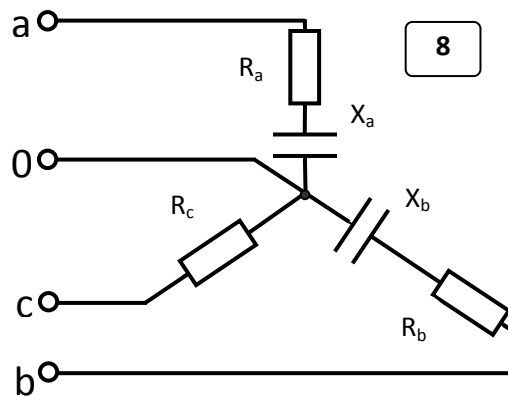
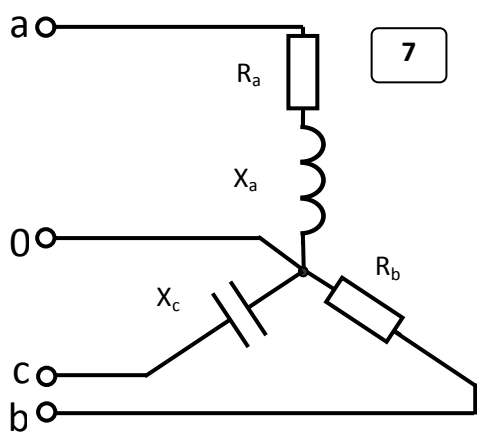
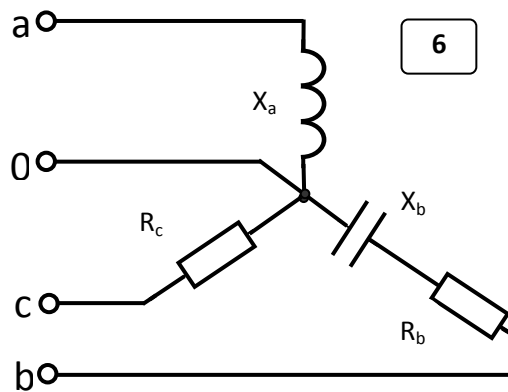
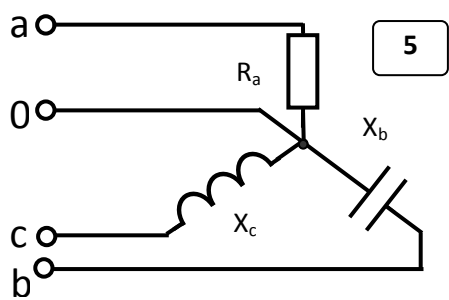
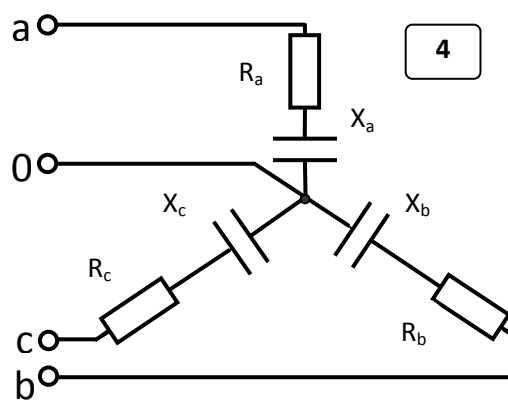
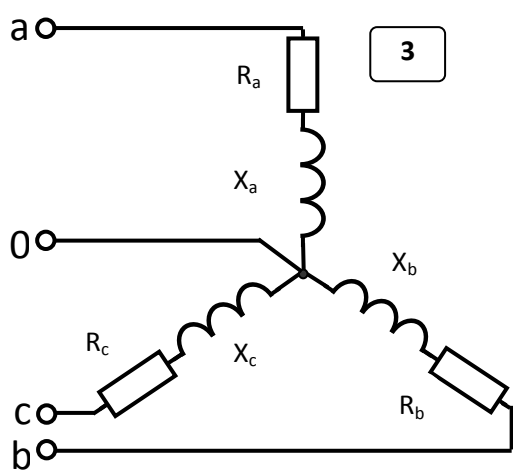
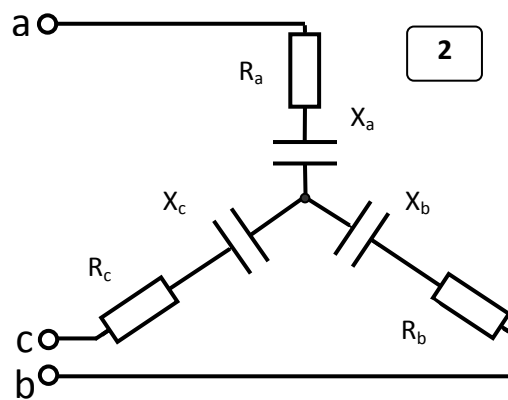
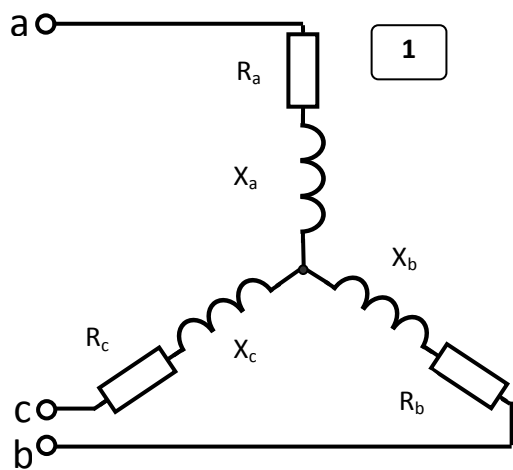
Таблица 4

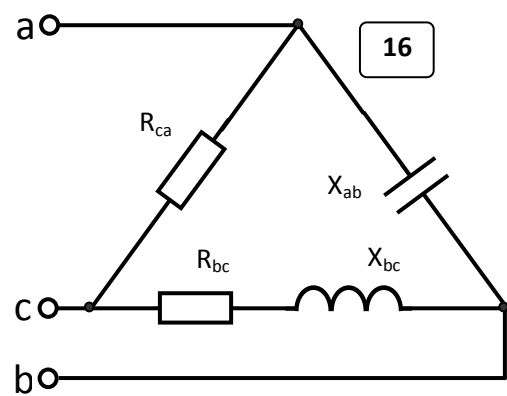
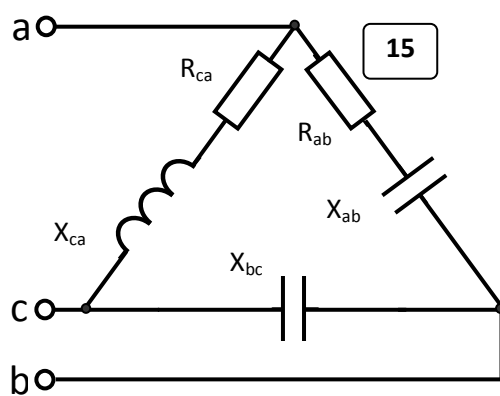
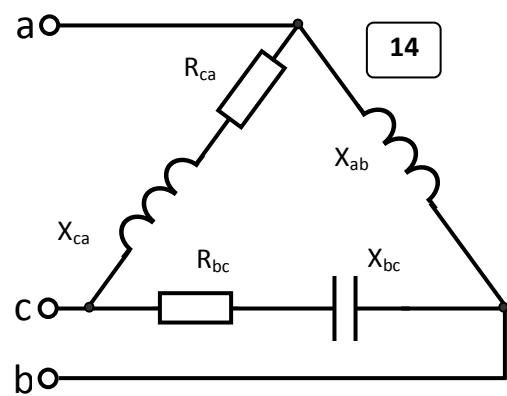
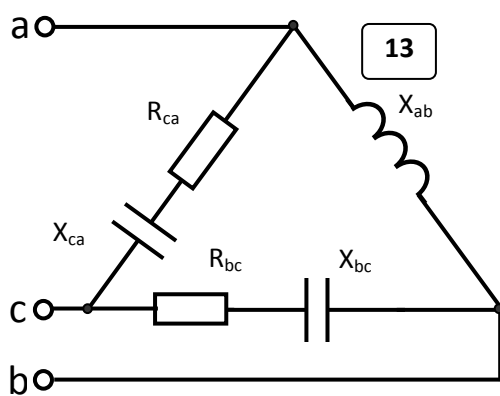
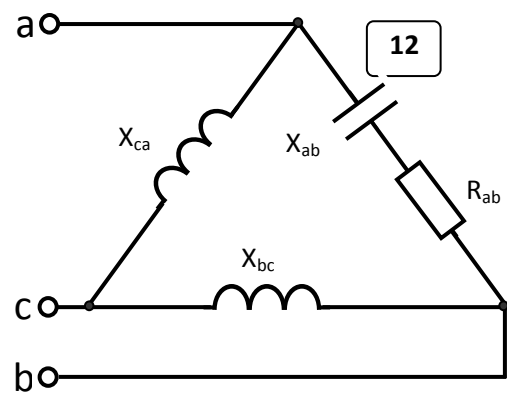
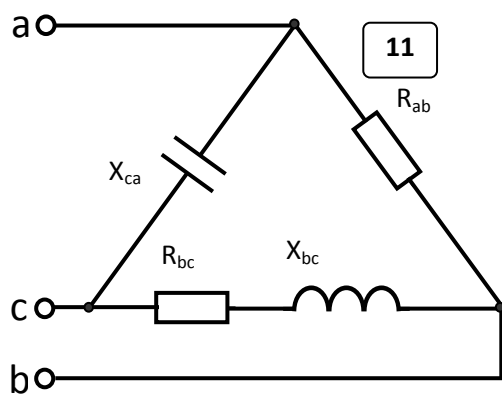
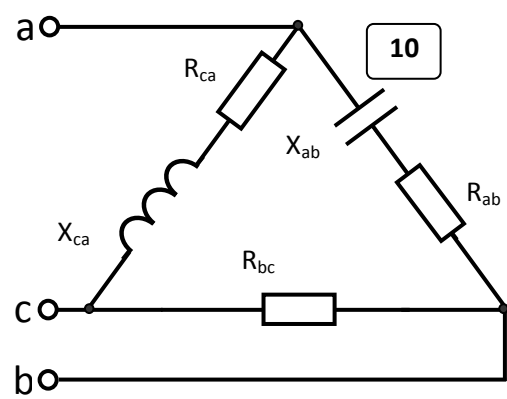
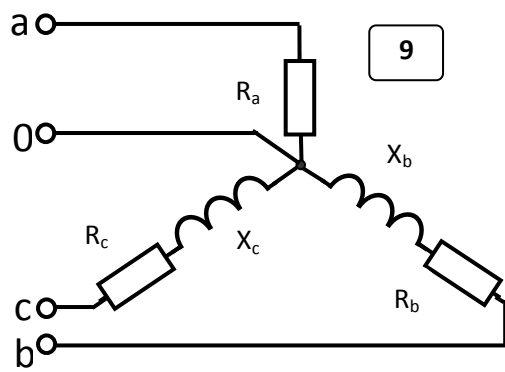
№ вари- анта	P _н кВт	U _н В	I _н А	n _н Об/мин	R _я Ом	R _в Ом
1	5.2	110	59	800	0.109	72.5
2	7.5	220	41	1000	0.278	72.5
3	16	440	41	2120	0.278	72.5
4	20	440	56	3150	0.161	98.5
5	9	220	53	750	0.492	49.2
6	12	110	135	1060	0.063	49.2
7	15	220	80	1500	0.13	49.2
8	26	220	133	3150	0.037	49.2
9	10	220	58	750	0.348	46.7
10	14	440	38	1000	1.047	72
11	18.5	220	97	1500	0.109	46.7
12	25	440	63	2200	0.22	46
13	32	440	80	3150	0.109	46.7
14	8.5	110	8	800	0.075	61.6
15	8.5	220	48	800	0.304	61.6
16	8.5	440	24	800	1.3	61.6
17	13	110	141	1120	0.042	61.6
18	13	220	70	1120	0.167	61.6
19	13	440	35	1000	0.788	61.6
20	22	220	114	1500	0.076	53
21	22	440	57	1500	0.376	53
22	36	220	185	2200	0.042	46
23	36	440	91	2200	0.167	46
24	11	110	120	800	0.051	55
25	11	220	60	800	0.205	55
26	16	220	85	1000	0.136	55
27	16	440	42	1000	0.567	55
28	30	220	153	1500	0.051	42
29	30	440	76	1600	0.265	42
30	53	440	133	2360	0.092	31.7
31	6	110	65	800	0.092	137
32	6	220	32	800	0.37	137
33	6	440	16	800	1.577	137
34	8	220	42	950	0.205	37.1
35	8	440	21	1060	0.958	137
36	11	220	56	1500	0.136	42
37	11	440	28	1500	0.454	137
38	15	220	76	2360	0.051	37.1
39	15	440	38	2360	0.205	137
40	9	220	48	1060	0.216	26.6
41	9	440	24	1060	0.895	96
42	14	220	72	1500	0.112	26.6
43	14	440	36	1500	0.466	96
44	20	220	102	2360	0.042	8
45	20	440	51	2200	0.216	74
46	7.1	110	72	750	0.092	23.7
47	7.1	220	39	750	0.37	102
48	7.1	440	19	750	1.577	102
49	11	220	58	1000	0.205	23.7
50	11	440	29	1000	0.764	102

Таблица 5

№ вари- анта	Р _Н	п _Н	M _{max} /M _Н	ρ	M _{С.НАЧ.}	M _{С.М.}	M _{НГ}
	кВт	об/мин			Нм	Нм	Нм
1	5.5	2850	2.2	1	15	40	15
2	7.5	2895	2.2	1	20	40	30
3	11	2910	2.2	1	36	80	30
4	15	2910	2.7	1	60	130	55
5	18.5	2910	2.7	1	30	150	65
6	22	2919	2.7	1	40	200	60
7	30	2925	3	1	50	250	120
8	37	2940	2.8	1	40	300	100
9	45	2940	2.8	1	40	450	170
10	55	2940	2.6	1	150	360	140
11	11	1448	2.7	2	36	200	80
12	15	1455	2.9	2	36	280	80
13	18.5	1455	2.9	2	60	280	140
14	22	1463	2.4	2	140	300	140
15	30	1470	2.7	2	140	400	200
16	37	1470	2.7	2	120	720	200
17	45	1470	2.7	2	150	900	250
18	11	970	2.7	3	108	250	120
19	15	970	2.7	3	120	450	130
20	18.5	980	2.4	3	140	500	200
21	22	980	2.4	3	150	500	240
22	30	975	2.4	3	200	700	280
23	22	732	2.3	4	200	550	270
24	30	732	2.3	4	200	800	410
25	37	735	2.3	4	240	800	500
26	15	730	2.0	4	80	350	200
27	18.5	735	2.2	4	75	400	260
28	30	2945	2.5	1	40	200	90
29	11	2900	2.8	1	30	100	40
30	7.5	870	2.5	3	190	220	80
31	15	730	2.0	4	80	370	180
32	30	735	2.1	4	200	800	300
33	3	700	2.2	4	50	90	40
34	18.5	1465	2.3	2	50	260	120
35	11	975	2.0	3	40	200	100
36	15	1465	2.3	2	50	200	100
37	11	730	2.2	4	70	300	140
38	75	735	2.0	4	600	1800	900
39	90	740	2.3	4	300	2500	1000
40	7.5	2900	2.8	1	30	50	20
41	18.5	2940	2.2	1	20	100	60
42	132	1480	2.0	2	160	1500	700
43	15	975	2.0	3	180	300	140
44	2.2	950	2.2	3	20	35	20
45	11	975	2.0	3	5	300	140
46	7.5	2900	2.8	1	15	70	20
47	3	1435	2.4	2	20	50	30
48	5.5	2880	2.5	1	15	40	15
49	22	1470	2.3	2	60	300	140
50	3	700	2.2	4	40	80	30







Библиографический список

1. Касаткин, А.С. Курс электротехники: учеб. для вузов/ А.С.Касаткин, М.В.Немцов.-М.:Высш.шк.,2007.-542с.
2. Арсеньев, Г.Н. Основы теории цепей: практикум: учеб. пособие/ под ред. Г.Н.Арсеньева.-М.:ФОРУМ, 2007.-336с.
3. Иванов, И.И. Электротехника: учебник для неэлектротехнических направлений вузов/ И.И.Иванов, Г.И.Соловьев, В.С.Равдоник.-Спб.: Лань, 2006.-495с.
4. Кацман, М.М. Электрические машины: учебник по специальности «Электротехника»/ М.М. Кацман. - 5-е изд. перераб. и доп.- М.: Academia, 2003.-496с.

Образец титульного листа расчетно-графической работы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФГБУ ВПО «ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники

Контрольная работа по дисциплине
«Электроснабжение с основами электротехники»
Вариант №

Выполнил: студент группы
Иванов И.И.
№ зачетной книжки

Принял:

(должность, Ф.И.О. преподавателя)

Вологда
2014