

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА**

Саратовский техникум железнодорожного транспорта – филиал
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Самарский государственный университет путей сообщения»
СТЖТ – филиал СамГУПС

**КУРС ЛЕКЦИЙ
По дисциплине ОП.03**

**«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»
для студентов специальности 190623 «Техническая эксплуатация
подвижного состава железных дорог».**

.

Саратов 2023

РЕКОМЕНДОВАНО

к использованию в образовательной организации внутри

внутри филиала СамГУПС в г. Саратов

согласно решения методического совета

№1 от 21 сентября 2023 г.

ОДОБРЕНО

на заседании ЦМК

«Техническая эксплуатация
подвижного состава железных дорог»

Протокол № ____ от «__» _____ 20__ г.

Председатель

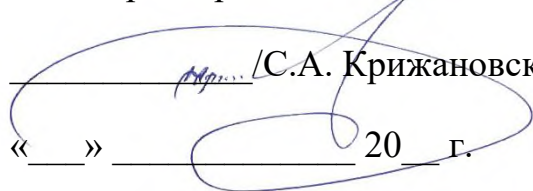


/ Д.К. Гусев /

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС специальности СПО 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог (приказ Минобрнауки РФ от 22.04.2014 № 388) и на основе профессионального стандарта «Работник по управлению обслуживанию локомотива» (утв. приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 21 апреля 2022 г. N 226н)

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по УР



/С.А. Крижановский/

«__» _____ 20__ г.

Составители (авторы):

Гусев Д.К., преподаватель филиала СамГУПС в г. Саратове;

Локтионов О.Б., преподаватель филиала СамГУПС в г. Саратове, высшей квалификационной категории;

Мелешкин В.Е., преподаватель филиала СамГУПС в г. Саратове.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Курс лекций для студентов по учебной дисциплине ОП.03 Электротехника является частью основной профессиональной образовательной программы в соответствии с ФГОС по специальности СПО: 190623 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог.

Учебная дисциплина «Электротехника» относится к циклу профессиональных и общепрофессиональных дисциплин и нацелена на развитие у студентов мышления и навыков сборки простейших электрических цепей, определения параметров электрических цепей; выбора электроизмерительных приборов и способов включения электроизмерительных приборов, построения электрических цепей, расчёта их параметров.

Цель применения курса в учебном процессе для студентов – систематизация книжных и электронных теоретических ресурсов для системного освоения необходимых материалов для изучения дисциплины «Электротехника».

В результате изучения материалов курса лекций обучающийся должен знать основные физические процессы, происходящие в электрических и магнитных цепях, способы включения электроизмерительных приборов, построения и расчёта электрических цепей.

В результате изучения данного курса студент должен сформировать следующие **общие компетенции:**

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

ОК 10. Исполнять воинскую обязанность, в том числе, с применением полученных профессиональных знаний (для юношей).

профессиональные компетенции:

ПК 1.1. Эксплуатировать подвижной состав железных дорог.

ПК 1.2. Производить техническое обслуживание и ремонт подвижного состава железных дорог в соответствии с требованиями технологических процессов.

ПК 2.2. Планировать и организовывать мероприятия по соблюдению норм безопасных условий труда.

ПК 2.3. Контролировать и оценивать качество выполняемых работ.

ПК 3.2. Разрабатывать технологические процессы на ремонт отдельных деталей и узлов подвижного состава железных дорог в соответствии с нормативной документацией.

Структура курса подчинена основным формам учебной работы и организации самостоятельной работы в виде работы с учебниками и электронными лекциями по дисциплине «Электротехника». Курс лекций включают список основной и дополнительной литературы к курсу, перечень экзаменационных вопросов по курсу.

Контроль умений и знаний по дисциплине производится по каждому разделу в виде оценки по пятибалльной системе.

При анализе и оценке ответа студента необходимо учитывать:

1. Знание основных понятий по дисциплине «Электротехника»;
2. Знание физических процессов, происходящих в электрических цепях, способы расчёта электрических цепей;
3. Знание типов свойств и способов включения электроизмерительных приборов;
4. Техническую грамотность студента, позволяющую определить глубину понимания студентом вопроса;
5. Умение применять знания, полученные по другим дисциплинам.

Критерии оценки:

Оценка «5» (отлично) – ставится студенту, полностью и правильно выполнившему все практические и исследовательские задания, понимая происходящие процессы, ответившему полностью на все контрольные вопросы и дополнительные вопросы, что соответствует 10 дидактическим баллам.

Оценка «4» (хорошо) – ставится студенту, который допустил незначительные ошибки при выполнении заданий и в ответах на контрольные вопросы и ответил на дополнительные вопросы, что соответствует 8 дидактическим баллам.

Оценка «3» (удовлетворительно) – ставится студенту, который не полностью выполнил задания, понимая происходящие процессы или(и) не полностью ответил на контрольные вопросы, показав понимание данной темы и ответил на дополнительные вопросы при, что соответствует 6 дидактическим баллам.

В остальных случаях выставляется оценка «2» (неудовлетворительно).
но).

Оглавление

Введение.	6
1. Электростатика.	7
1.1. Электрическое поле.	7
1.2. Электрическая ёмкость и конденсаторы.	10
1.3. Тесты для самоконтроля по разделу 1.	12
1.4. Задания для самоконтроля по разделу 1.	15
2. Электрические цепи постоянного тока.	16
2.1. Электрический ток, сопротивление, проводимость.	16
2.2. Электрическая энергия и мощность.	20
2.3. Расчёт электрических цепей постоянного тока.	24
2.4. Расчёт цепей методом преобразования.	29
2.5. Химические источники электрической энергии.	32
2.6. Примеры решения задач к разделу 2.	34
2.7. Тесты для самоконтроля по разделу 2.	40
2.8. Задания для самоконтроля по разделу 2.	43
3. Электромагнетизм.	48
3.1. Магнитное поле постоянного тока.	48
3.2. Электромагнитная индукция.	50
3.3. Тесты для самоконтроля по разделу 3.	53
3.4. Задания для самоконтроля по разделу 3.	54
4. Электрические цепи переменного однофазного тока.	55
4.1. Синусоидальный электрический ток.	55
4.2. Цепь переменного тока с последовательным соединением элементов.	61
4.3. Цепь переменного тока с параллельным соединением элементов.	65
4.4. Резонанс в электрических цепях переменного однофазного тока.	69
4.5. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока.	73
4.6. Примеры решения задач к разделу 4.	77
4.7. Тесты для самоконтроля по разделу 4.	83
4.8. Задания для самоконтроля по разделу 4.	87
5. Трёхфазные цепи.	88
5.1. Получение трёхфазного тока.	88
5.2. Расчет цепей трёхфазного тока.	92
5.3. Примеры решения задач к разделу 5.	103
5.4. Тесты для самоконтроля по разделу 5.	108
5.5. Задания для самоконтроля по разделу 5.	110
6. Электрические измерения.	111
6.1. Измерения. Стрелочные измерительные приборы.	111
6.2. Измерение сопротивления, мощности, энергии. Цифровые приборы. Осциллограф.	117
7. Основные термины и определения.	125
10. Ответы к тестам и заданиям для самоконтроля.	128
Список использованных источников.	130

Введение.

Электротехника является областью науки, которая занимается изучением электротехнических и магнитных явлений и их техническим использованием в практических целях.

Интенсивное использование электрической энергии связано со следующими ее особенностями: возможностью достаточно простого и экономичного преобразования в другие виды энергии (механическую, тепловую, лучистую и т.д.); возможность централизованного и экономичного получения на различных электростанциях; простой передачи с помощью линий электропередачи с малыми потерями на большие расстояния к потребителям.

Высокая рентабельность и конкурентоспособность современных предприятий базируется на полной механизации и автоматизации производственных процессов. Решение этих задач требует создания автоматизированных систем управления на основе современной электротехнической и электронной аппаратуры и электрооборудования. Во всех отраслях производства с помощью электротехнической аппаратуры осуществляется управление производственными механизмами, автоматизация их работы, контроль за ведением производственного процесса, обеспечение безопасности обслуживания и т.д. Следовательно, функции электротехнических устройств машин настолько значительны по сравнению с их механической частью, что именно они во многом определяют такие важные показатели, как производительность, качество и надежность создаваемой продукции.

В курсе "Электротехника" осуществляется анализ явлений, происходящих в электрических и магнитных цепях. Изучаются вопросы связанные с установившимися и переходными процессами, с расчетами цепей постоянного переменного тока, с устройством и принципом действия трансформаторов, электромагнитных устройств, электрических машин постоянного и переменного тока, информационных электрических машин.

Знание перечисленного материала дает возможность будущим специалистам свободно разбираться в устройстве и принципе действия разнообразной электротехнической аппаратуры, электрических машин и оборудования и грамотно использовать их в практической деятельности.

1. Электростатика.

1.1. Электрическое поле.

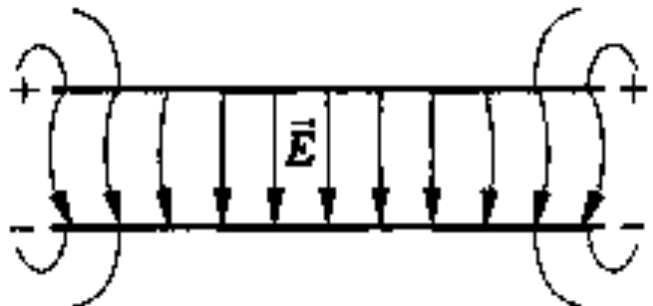
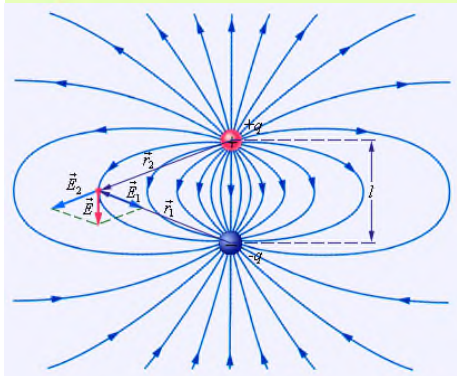
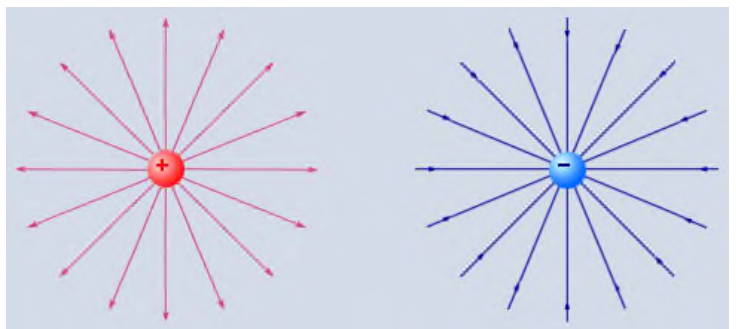
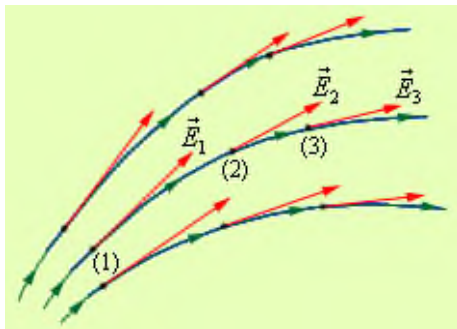
Всякое тело содержит большое количество заряженных частиц. Элементарная частица протон имеет заряд, которому условно приписан положительный знак, электрон – отрицательный. **Разноимённозаряженные частицы или тела притягиваются друг к другу, одноимённозаряженные – отталкиваются.**

Электромагнитное поле характеризуется двумя взаимно связанными составляющими : магнитным полем и **электрическим полем**, которые выявляются по силовому действию на заряженные частицы или тела. Электрическое поле неподвижных зарядов называется **электростатическим**. Электрическое поле обладает энергией, которую называют **электрической энергией**.

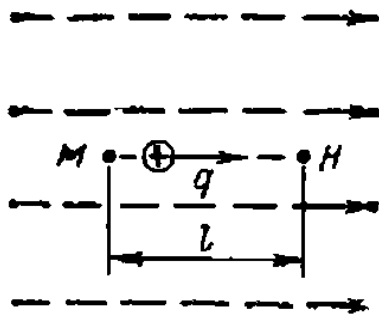
Напряжённость электрического поля E определяется отношением силы F , с которой поле заряженных частиц или тел действует на точечный пробный заряд q , находящийся в данной точке поля, к величине этого заряда:

$$E=F/q.$$

Напряжённость поля имеет величину и направление, т.е. напряжённость величина **векторная**. Электрическое поле графически изображается линиями напряжённости электрического поля. Линии напряжённости проводятся так, чтобы вектор напряжённости поля был направлен по касательной к ней. Линия напряжённости начинается на положительном заряде, заканчивается на отрицательном, т. о. она не замкнута. Поле называется **однородным**, если во всех его точках векторы напряжённости равны.



Допустим, что положительный точечный заряд q переместился в однородном электрическом поле под действием сил этого поля из точки М в точку Н на расстояние l в направлении поля.



Совершаемая при этом **работа**:

$$A = Fl = Eq l$$

Величина, определяемая отношением работы по перемещению точечного положительного заряда q между двумя точками поля к величине заряда, называется электрическим напряжением между точками М и Н:

$$U = A/q$$

В однородном поле

$$U = A/q = Eq l / q = El$$

Единицы измерения.

Длина (l) - метр (М).

Сила (F) - ньютон (Н).

Работа (A) – джоуль (Дж).

Электрический заряд (q) - кулон (Кл).

Электрическое напряжение (U) - вольт (В), поэтому $1В = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$.

Напряжённость электрического поля (E) – вольт на метр (В/М).

Потенциальная энергия, отнесённая к величине заряда, находящегося в какой либо точке электрического поля называется потенциалом этой точки.

$$f = W/q$$

где f потенциал точки в вольтах, а W потенциальная энергия заряда q в этой точке в джоулях.

При перемещении заряда q из точки М в точку Н, производимая работа равна изменению запаса потенциальной энергии поля:

$$A = W_M - W_N = f_M q - f_N q = q(f_M - f_N)$$

Откуда

$$U_{MN} = A/q = q(f_M - f_N)/q = f_M - f_N$$

Т.о. напряжение между двумя точками электрического поля равно разности потенциалов этих точек. Если потенциал, например, точки Н будет равен 0, то напряжение будет равно потенциалу точки М, т.е. **напряжение между данной точкой электрического поля и другой произвольно выбранной точкой, потенциал которой принят равным 0, является потенциалом данной точки поля.**

Сила, с которой взаимодействуют заряды, определяется **законом Кулона**, который определяет, что **сила взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел прямо пропорциональна произведению зарядов этих тел, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и зависит от среды**, и выражается формулой:

$$F = Q_1 \cdot Q_2 / 4 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \epsilon \alpha$$

Где Q_1 и Q_2 заряды точечных тел, Кл, l – расстояние между их центрами, М, $\epsilon \alpha$

– абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (Ф/М), в которой находятся заряженные тела (табличное).

Все вещества делятся на **проводники, изоляторы (диэлектрики) и полупроводники**. Проводники 1 рода это металлы и сплавы. В них электрический ток создаётся перемещением электронов. Проводники второго рода это расплавы солей, растворы кислот, солей, щелочей. Это проводники с ионной проводимостью. **Диэлектрики** при нормальных условиях обладают ничтожной проводимостью, поэтому условно считаются изоляторами. Их характеризует величина, которая называется диэлектрической проницаемостью. Единица измерения фарад на метр (Ф/М). Диэлектрическая проницаемость вакуума $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/М. **Полупроводники** занимают промежуточное место по электропроводности. Обладают электронной и дырочной проводимостью.

1.2. Электрическая ёмкость и конденсаторы.



Конденсатором называют устройство из двух металлических пластин или проводников произвольной формы (обкладок), разделённых диэлектриком. Простейший плоский конденсатор образуется плоскими параллельно расположенными металлическими пластинами, разделёнными слоем изоляции. Если пластины конденсатора присоединить к источнику питания с постоянным напряжением U то на них образуются равные по величине, но противоположные по знаку заряды $+q$ и $-q$.

Отношение заряда одной из обкладок q к приложенному напряжению U называется ёмкостью конденсатора C .

$$C = q/U$$

Ёмкость измеряется в **фарадах (Ф)**.

Ёмкость конденсатора прямо пропорциональна площади пластин S и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами d :

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S/d,$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора.

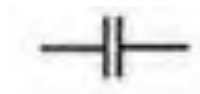
Относительная диэлектрическая проницаемость равна отношению абсолютной диэлектрической проницаемости к диэлектрической проницаемости вакуума.

$$\epsilon_k = \epsilon \cdot \epsilon_0$$

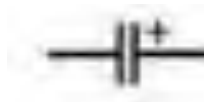
Напряжённость электрического поля плоского конденсатора:

$$E = U/d$$

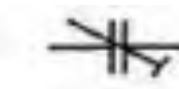
Конденсаторы широко применяются в различных устройствах. Пластинчатые конденсаторы имеют небольшую ёмкость, электролитические конденсаторы имеют намного большую ёмкость. Они имеют полярность обкладок. Существуют конденсаторы переменной ёмкости. Конденсаторы обозначаются на схемах следующим образом.



конденсатор



электролитический конденсатор



конденсатор переменной ёмкости

1.3. Тесты для самоконтроля по разделу 1.

1. Силовой характеристикой электрического поля является
 - А) напряжённость
 - Б) потенциал
 - В) электрическое напряжение
 - Г) сила тока

2. Энергетической характеристикой электрического поля является
 - А) напряжённость
 - Б) электрическое напряжение
 - В) потенциал
 - Г) ёмкость

3. Разность потенциалов между двумя точками электрического поля называется
 - А) напряжённостью поля
 - Б) электрической ёмкостью
 - В) электрическим напряжением
 - Г) электрическим током

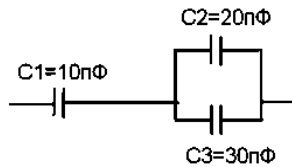
4. Что определяется законом Кулона
 - А) сила взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел
 - Б) разность потенциалов между двумя точками электрической цепи
 - В) потенциальная энергия заряда
 - Г) сила тяжести

5. Устройство, состоящее из двух проводников любой формы, разделенных диэлектриком называется
 - А) источником энергии
 - Б) резистором
 - В) реостатом
 - Г) конденсатором

6. Вещества, почти не проводящие электрический ток называются
 - А) диэлектриками
 - Б) металлами
 - В) полупроводниками
 - Г) жидкостями

7. Какое из приведённых выражений соответствует ёмкости плоского конденсатора
 - А) $C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S/d$
 - Б) $C = U \cdot I$;
 - В) $C = Q \cdot U$.
 - Г) нет верного ответа

8. Определить эквивалентную ёмкость



- А) 6.13 пФ
- Б) 8.33 пФ
- В) 0,61 пФ
- Г) верный ответ не приведён.

9. На заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл действует сила $F = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Н. Определить напряжённость электрического поля в данной точке

- А) 1,5 В/м
- Б) 1,5 А
- В) 0,15 А
- Г) 0,15 В/м

10. Электрический заряд измеряется в

- А) Гн
- Б) Ом
- В) Кл
- Г) Дж

11. Отношение заряда одной из обкладок конденсатора к приложенному к нему напряжению называется _____ конденсатора

- А) сопротивлением
- Б) индуктивностью
- В) напряжением
- Г) ёмкостью

12. Относительная диэлектрическая проницаемость равна отношению

- А) приведённой диэлектрической проницаемости к диэлектрической проницаемости вакуума
- Б) абсолютной диэлектрической проницаемости к диэлектрической проницаемости вакуума
- В) диэлектрической проницаемости вакуума к абсолютной диэлектрической проницаемости
- Г) диэлектрической проницаемости вакуума к приведённой диэлектрической проницаемости

13. Напряжённость электрического поля измеряется в

- А) В/М
- Б) А/М
- В) В/сек.
- Г) А/сек.

14. Ёмкость конденсатора измеряется в

- А) генри
- Б) амперах
- В) вольтах
- Г) фарадах

15. Электрическое поле неподвижных зарядов называется

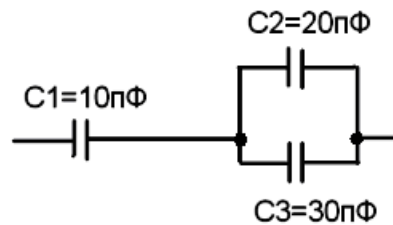
- А) магнитоэлектрическим
- Б) магнитным
- В) электростатическим
- Г) электродинамическим

1.4. Задания для самоконтроля по разделу 1.

1. На заряд $q = 1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл действует сила $F = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Н. Определить напряжённость электрического поля в данной точке. Определить заряд q_0 , создающий это поле, если он удалён от этой точки на расстояние $l = 0,3$ м в вакууме. ϵ_0 вакуума равно $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

2. К выводам плоского воздушного конденсатора приложено напряжение $U = 800$ В. Определить напряжённость электрического поля конденсатора при расстоянии между пластинами $d = 5$ мм и силу, действующую в этом поле на единичный заряд $q = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Кл. Определить ёмкость конденсатора, если площадь каждой пластины $S = 24$ см². Как изменится эта ёмкость, если конденсатор поместить в спирт, относительная удельная проницаемость которого 33.

3. Определить эквивалентную ёмкость цепи конденсаторов на рисунке.



2. Электрические цепи постоянного тока.

2.1. Электрический ток, сопротивление, проводимость.

Для возникновения и прохождения электрического тока необходимо:

1. Наличие в проводнике носителей зарядов, которые могут перемещаться,
2. Наличие в проводнике электрического поля.

Свободные электроны хаотически движутся в пространстве решётки между атомами. Под действием продольного электрического поля и, создаваемого в проводнике источником электрической энергии, свободные электроны приобретают добавочную скорость и перемещаются в одном направлении вдоль проводника. **Постоянный ток в проводящей среде представляет собой упорядоченное движение положительных и отрицательных зарядов под действием электрического поля.**

Интенсивность электрического тока характеризуется **силой тока**. При постоянном токе сила тока I определяется зарядом q , проходящим через выделенную поверхность проводника (для проводов через поперечное сечение) в единицу времени t .

$$I = q/t$$

Сила тока измеряется в **амперах (А)**. $1\text{А} = 1\text{Кл/С}$.

За направление тока принимают направление, в котором перемещаются положительно заряженные частицы, или направление, противоположное движению электронов.

Электрическое напряжение на концах участка цепи это разность потенциалов между концами этого участка:

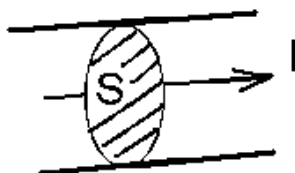
$$U = \phi_1 - \phi_2$$

или:

$$U = A/q,$$

где A работа электрического поля при перемещении положительного заряда q вдоль участка проводника. Напряжение измеряется в **вольтах (В)**.

При равномерном распределении тока по выделенной поверхности проводника



отношение силы тока I к площади S этой поверхности определяет плотность тока:

$$\sigma = I/S$$

Плотность тока измеряется в ампер на метр (А/М). В проводах используют А/мм.

Плотность тока в проводнике определяется удельной проводимостью металла:

$$\sigma = \gamma E$$

где γ - **удельная проводимость проводника.**

Зависимость между силой тока на участке провода и напряжением определяется законом Ома. Закон Ома для участка цепи определяет: **сила тока в проводе прямо пропорциональна напряжению между его концами и обратно пропорциональна сопротивлению провода.**

$$I = U/R,$$

где **R-электрическое сопротивление. Измеряется в Омах (Ом).**

При прохождении тока по проводу, свободные электроны, перемещаясь под действием сил электрического поля, сталкиваются с атомами и молекулами провода и тормозятся, т. е. они испытывают противодействие, которое называется **сопротивление.**

$$R = U/I$$

Поэтому $\text{Ом} = \text{В}/\text{А}$. Сопротивление в 1 Ом имеет провод, в котором устанавливается ток 1А при напряжении на его концах 1 В.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью.

$$g = 1/R$$

Единица измерения проводимости называется **Сименс (См).** $1 \text{ См} = 1 / 1 \text{ Ом}$.

Величина обратная удельной проводимости называется удельным сопротивлением.

$$\rho = 1/\gamma$$

Сопротивление следующим образом выражается через удельную проводимость и удельное сопротивление.

$$R = l/\gamma S = \rho l/S,$$

где l – длина проводника в М , а S – площадь поперечного сечения проводника в М² . Единица измерения удельного сопротивления Ом·М, но эти величины очень малы, поэтому чаще в справочниках используют Ом·мм² /М , причём $1 \text{ Ом} \cdot \text{М} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{М}$. Соответственно единица удельной проводимости М/(Ом·мм²).

Устройства, которые включаются в электрическую цепь для ограничения или регулирования тока, называются резисторами.



Резисторы бывают регулируемые и нерегулируемые, проволочные и непроволочные. Регулируемый проволочный резистор называется **реостатом**. Непроволочный резистор состоит из керамической трубки с нанесённым на её поверхность слоем полупроводника. Проводящий слой покрывают эмалью, а на концах укрепляют латунные выводы. Переменный (регулируемый) непроволочный резистор называют **потенциометром**. Резисторы обозначаются на схемах следующим образом.



При нагревании проводов происходит увеличение удельного сопротивления самого провода. При реальных изменениях температуры (0-100 °C) приращение сопротивления большинства металлов пропорционально приращению температуры.

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2 - t_1),$$

где R_2 и R_1 сопротивления проводника при температурах t_2 и t_1 , α - температурный коэффициент сопротивления. Измеряется в $1/^\circ\text{C}$.

Совокупность устройств, предназначенных для создания и прохождения в них электрического тока, называется электрической цепью. Изображение электрической цепи с помощью условных обозначений называют электрической схемой.

Зависимость тока, протекающего по сопротивлению, от напряжения на этом сопротивлении называют вольт-амперной характеристикой

(ВАХ). По оси абсцисс на графике обычно откладывают напряжение, а по оси ординат — ток. Сопротивления, ВАХ которых являются прямыми линиями, называют линейными, электрические цепи только с линейными сопротивлениями — **линейными электрическими цепями**. Сопротивления, ВАХ которых не являются прямыми линиями, то есть они нелинейны, называют нелинейными, а электрические цепи с нелинейными сопротивлениями — **нелинейными электрическими цепями**.

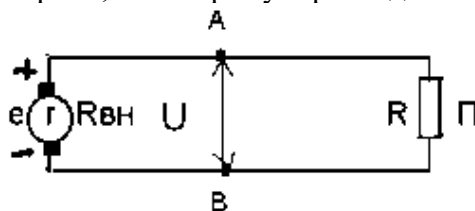
2.2. Электрическая энергия и мощность.

Замкнутая электрическая цепь представляет собой совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока. Электрическая цепь состоит из отдельных элементов, которые делят на 3 группы. Первая группа это элементы для выработки электроэнергии (источники питания). Вторая группа — элементы, преобразующие электроэнергию в другие виды энергии (электроприемники). В третью группу входят элементы для передачи электроэнергии от источника питания к электроприемнику (провода, устройства, обеспечивающие уровень и качество напряжения, и др.). Источник питания представляет собой **внутренний участок** цепи, вся остальная часть цепи **внешний участок**.

Чтобы электрический ток проходил по цепи продолжительное время, нужно непрерывно поддерживать разность потенциалов на полюсах источника напряжения, к которому присоединена электрическая цепь. Внутри источника электрической энергии действует сила, которая должна непрерывно поддерживать ток в цепи. **Причина, которая устанавливает и поддерживает разность потенциалов на зажимах источника, вызывает ток в цепи, преодолевая ее внешнее и внутреннее сопротивление, называется электродвижущей силой** (сокращенно Э. Д. С.) и обозначается буквой e (измеряется в вольтах). Электрическое напряжение на разомкнутых зажимах источника питания равно его Э.Д.С.

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = e$$

В электрическом генераторе Γ , к которому присоединён приёмник Π , под



действием сил электромагнитной индукции непрерывно происходит разделение электрических зарядов. При этом работа, совершаемая этими силами при перемещении заряда q в полученной замкнутой цепи, или, как говорят, выработанная энергия, определяется по формуле:

$$A_{\Gamma} = eq$$

Учитывая, что $q = It$, получаем:

$$A_{\Gamma} = eIt$$

По закону сохранения энергии, электрическая энергия, выработанная генератором за время t , в течение того же времени преобразуется в другие виды энергии во всех участках цепи (во внешнем - приёмнике Π и во внутреннем - самом генераторе Γ). Напряжение U на зажимах АБ приёмника равно напряжению на тех же зажимах генератора, тогда энергия, затраченная во внешнем участке цепи:

$$A = Uq = UIt$$

Вторая часть энергии затрачивается (теряется) внутри самого генератора на его нагревание:

$$A_{\text{в}} = A_{\text{г}} - A = (e - U)It = U_{\text{в}}It$$

Разность Э.Д.С. e генератора и напряжения U на его зажимах называется внутренним падением напряжения.

$$U_{\text{в}} = e - U$$

или

$$e = U + U_{\text{в}}$$

Таким образом, Э.Д.С. генератора равна сумме напряжения на его зажимах и внутреннего падения напряжения в нём.

Внутреннее падение напряжения увеличивается с ростом тока в цепи.

$$U_{\text{в}} = R_{\text{в}}I,$$

где $R_{\text{в}}$ **внутреннее сопротивление** генератора.

Если цепь разомкнута, т.е. генератор работает без нагрузки, вхолостую, то ток в цепи отсутствует, и потерь энергии на нагрев генератора нет. Поэтому внутреннее падение напряжения $U_{\text{в}} = 0$, и Э.Д.С. $e = U$. Т.е. Э.Д.С. генератора можно измерить при его работе вхолостую.

Отношение работы A к промежутку времени t , в течение которого она выполняется называется мощностью.

$$P = A/t$$

Скорость, с которой какая либо энергия преобразуется в источнике в электрическую, называется **мощностью генератора** (источника)

$$P_{\text{г}} = A_{\text{г}}/t = eIt/t = eI$$

Скорость, с которой электрическая энергия преобразуется во внешнем участке цепи в другие виды энергии, называется **мощностью потребителей.**

$$P = A/t = UIt/t = UI$$

Мощность, определяющая непроизводительный расход энергии, например на тепловые потери в генераторе называется **мощностью потерь.**

$$P_{\text{в}} = A_{\text{в}}/t = U_{\text{в}}It/t = U_{\text{в}}I$$

Таким образом **мощность генератора равна сумме мощностей потребителя и потерь.**

$$P_{\Gamma} = P + P_{\text{в}}$$

Это выражение называется **баланс мощности** электрической цепи.

Единица измерения мощности **Ватт (Вт)**. $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/1 с} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$.

Электрическая энергия измеряется в ватт-часах (Вт·ч) или киловатт-часах (кВт·ч). Один киловатт- час это **работа**, совершаемая в течении одного часа при мощности один киловатт. $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$, $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}$.

Коэффициентом полезного действия (КПД) источника называется отношение полезной мощности к полной мощности источника. Полезная мощность это мощность потребителя, а полная мощность - мощность генератора.

$$\text{КПД} = P \cdot 100\% / P_{\Gamma} = IU \cdot 100\% / I_e = U \cdot 100\% / e$$

Преобразование электрической энергии в тепловую. Электрический ток представляет собой направленное движение электрически заряженных частиц. При столкновении движущихся частиц с ионами или молекулами вещества кинетическая энергия движущихся частиц передаётся ионам или молекулам, вследствие чего происходит нагревание проводника. Электрическая энергия преобразуется в тепловую.

Количество тепла, выделенное, постоянным током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

$$Q = I^2 R t$$

Это **закон Джоуля-Ленца**.

Количество тепла измеряют в Дж (иногда в калориях $1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал.}$)

При прохождении тока по проводу провод нагревается. В начале нагревания температура провода и среды одинакова. С ростом температуры провода, увеличивается количество тепла, отдаваемого проводом в среду. И рост температуры провода замедляется. Наконец при некоторой температуре провода устанавливается тепловое равновесие, когда количество тепла выделяемого проводом, равно теплу, отдаваемому проводом в окружающую среду. Время от начала нагрева до теплового равновесия называется **временем нагрева** провода.

Нагрев проводов допускается до определённого значения ($65-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$). У изолированных проводов, допустимый нагрев определяется свойствами изоляции, у голых, изменением их механических свойств. **Ток, при котором, нагревание достигает предельно допустимой температуры, называется наибольшим допустимым или номинальным током провода.** Эта величина табличное значение, например для медных изолированных проводов.

Таблица

Поперечное сечение в мм ²	0.5	0.75	1.0	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35
Номинальный ток в А	11	15	17	23	30	41	50	80	100	140	170

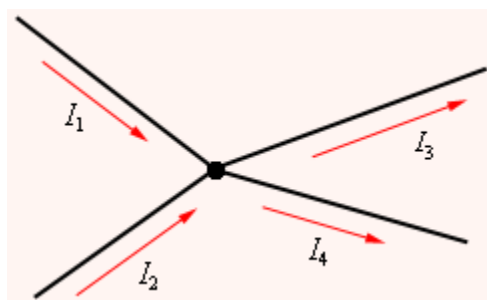
Коротким замыканием (к.з.) называется **непосредственное соединение двух проводов или участков цепи с разными потенциалами**. Токи к.з. могут достигать очень больших значений, превышающих допустимые, что может привести к повреждению и разрушению установок. Электрические цепи защищаются от теплового действия токов перегрузки и токов короткого замыкания **плавкими предохранителями** или релейными устройствами. Основной частью плавкого предохранителя является вставка - короткий кусок провода из легкоплавкого материала, который нагреваясь, током перегрузки, расплавляется и разрывает цепь.



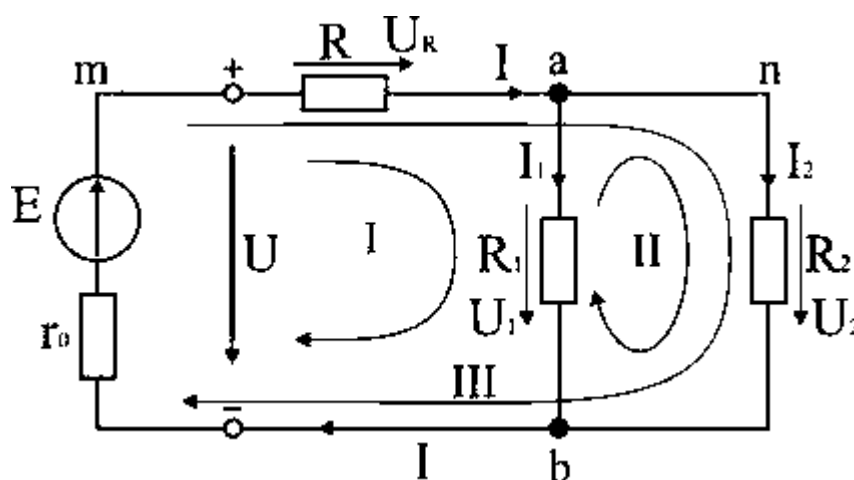
2.3. Расчёт электрических цепей постоянного тока.

Основные понятия.

Узел электрической цепи (схемы) – место соединения трех и более ветвей.



Ветвь электрической цепи (схемы) – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. **Контур** – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. В схеме на рис.2.10 можно выделить три контура: I – mab; II – anba; III – manbm, на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.



Все электрические цепи делятся на линейные и нелинейные. В **линейной электрической цепи** все элементы – линейные. Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) не зависят от тока в нем, называют линейным, например электропечь.

Первый закон Кирхгофа.

В любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю.

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0$$

где m – число ветвей подключенных к узлу.

При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус». Например, для узла на первом рисунке $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

Если направления токов в ветвях не известны, то при составлении уравнений их необходимо выбрать произвольно, и обозначить на схеме стрелками. Реальные направления токов могут не совпадать с выбранными. Выбранные направления называют положительными. Если в результате расчётов какой то ток будет отрицательным, то его направление противоположно выбранному.

Второй закон Кирхгофа.

В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех его участках.

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

где n – число источников ЭДС в контуре;

m – число элементов с сопротивлением R_k в контуре;

$U_k = R_k I_k$ – напряжение или падение напряжения на k -м элементе контура.

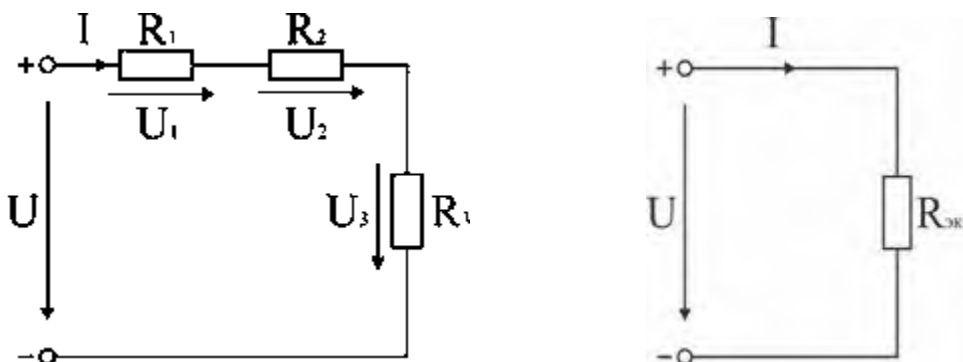
Для нашей схемы запишем уравнение по второму закону Кирхгофа: $E = UR + U_1$.

Запишем уравнения по II закону Кирхгофа для контуров электрической схемы: контур I: $E = RI + R_1 I_1 + r_0 I$, контур II: $R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0$, контур III: $E = RI + R_2 I_2 + r_0 I$.

Способы соединения сопротивлений и расчет эквивалентного сопротивления электрической цепи.

Сопротивления в электрических цепях могут быть соединены последовательно, параллельно, по смешанной схеме и по схемам «звезда», «треугольник». Расчет сложной схемы упрощается, если сопротивления в этой схеме заменяются одним эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$, а расчет токов и напряжений производится с помощью законов Ома и Кирхгофа.

Электрическая цепь с последовательным соединением элементов.



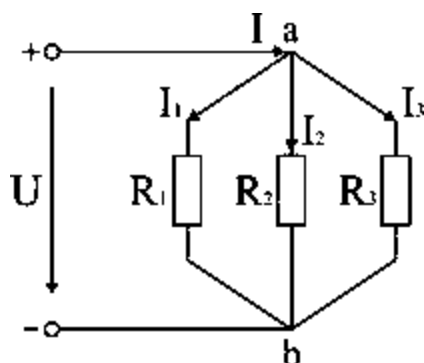
Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором во всех включенных в цепь элементах возникает один и тот же ток I . На основании второго закона Кирхгофа общее напряжение U всей цепи равно сумме напряжений на отдельных участках:

$U = U_1 + U_2 + U_3$ или $IR_{\text{экв}} = IR_1 + IR_2 + IR_3$, откуда следует

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Таким образом, при последовательном соединении элементов цепи общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков.

Электрическая цепь с параллельным соединением элементов.



В этом случае они присоединены к двум узлам цепи a и b , и на основании первого закона Кирхгофа (1.3) можно записать, что общий ток I всей цепи равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей: $I = I_1 + I_2 + I_3$, т.е

$$\frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

откуда следует, что

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

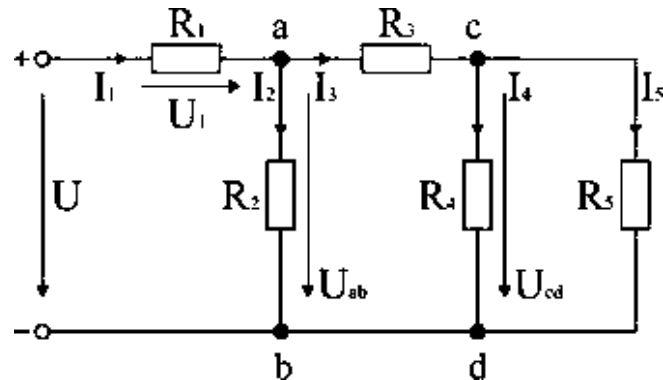
В том случае, когда параллельно включены два сопротивления R_1 и R_2 , они заменяются одним эквивалентным сопротивлением

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Эквивалентная проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3.$$

Электрическая цепь со смешанным соединением элементов.



Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных сопротивлений.

$$R_{cd} = R_4 R_5 / (R_4 + R_5)$$

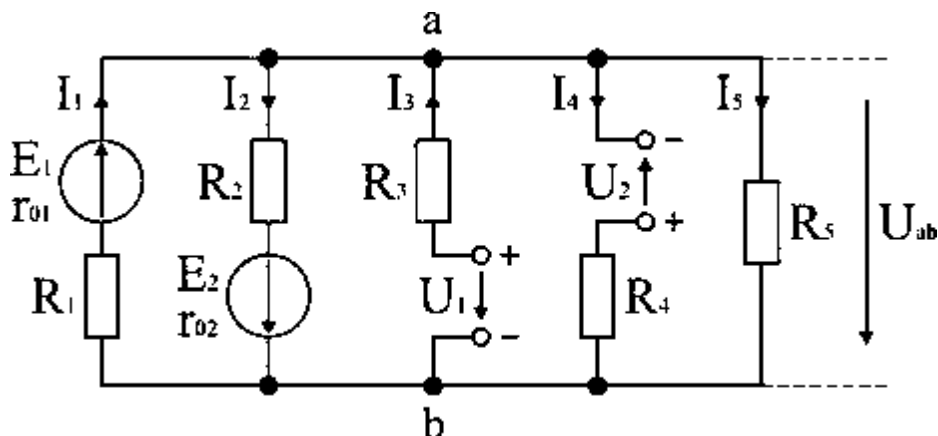
$$R_{ad} = R_3 + R_{cd}$$

$$R_{ab} = R_2 R_{ad} / (R_2 + R_{ad})$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_{ab}$$

Метод узлового напряжения.

Этот метод рекомендуется использовать в том случае, если сложную электрическую схему можно упростить, заменяя последовательно и параллельно соединенные резисторы эквивалентными, используя при необходимости преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду.



Пренебрегая сопротивлением проводов, соединяющих ветви цепи, в ее схеме можно выделить два узла: а и б. В з Предположим, что узловое напряжение U_{ab} известно, тогда легко найти токи во всех ветвях. Выберем положительные направления токов. Запишем

уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров, проходящих по первой и второй ветви, содержащих источники ЭДС, совершая обход контуров по часовой стрелке.

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_{01} + R_1} = (E_1 - U_{ab})g_1$$

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{ab}}{r_{02} + R_2} = (E_2 + U_{ab})g_2$$

$$g_1 = \frac{1}{r_{01} + R_1} \quad g_2 = \frac{1}{r_{02} + R_2} \quad \text{– проводимости соответственно первой и второй ветвей.}$$

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для ветвей, содержащих источники напряжений, совершая обход контуров также по часовой стрелке. Третья ветвь: $U_{ab} - U_1 + I_3 R_3 = 0$. Четвертая ветвь: $U_{ab} + U_2 - I_4 R_4 = 0$. Определим значения токов, возникающих в третьей и четвертой ветвях,

$$I_3 = \frac{U_1 - U_{ab}}{R_3} = (U_1 - U_{ab})g_3$$

$$I_4 = \frac{U_2 + U_{ab}}{R_4} = (U_2 + U_{ab})g_4$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3} \quad g_4 = \frac{1}{R_4} \quad \text{– проводимости соответственно третьей и четвертой ветвей.}$$

Ток в пятой ветви определим по закону Ома:

$$I_5 = \frac{U_{ab}}{R_5} = U_{ab}g_5$$

$$g_5 = \frac{1}{R_5} \quad \text{– проводимость пятой ветви.}$$

Для вывода формулы, позволяющей определить напряжение U_{ab} , напомним уравнение по первому закону Кирхгофа для узла а

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

После соответствующих преобразований получим

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + U_1 g_3 - U_2 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5}$$

Формула узлового напряжения в общем случае имеет вид

$$U_{ab} = \frac{\sum E g + \sum U g}{\sum g}$$

2.4. Расчёт цепей методом преобразования.

В некоторых случаях расчет сложной цепи значительно упрощается, если треугольник сопротивлений заменить звездой сопротивлений, имеющими дополнительный общий узел О. Встречается необходимость звезду заменить треугольником. Взаимные замены должны быть эквивалентными, т. е. при соответственно равных напряжениях между вершинами А, Б и В треугольника и звезды токи I_A , I_B , I_B в подводящих проводах, соединяющих эти вершины с остальной частью цепи, должны остаться без изменений.

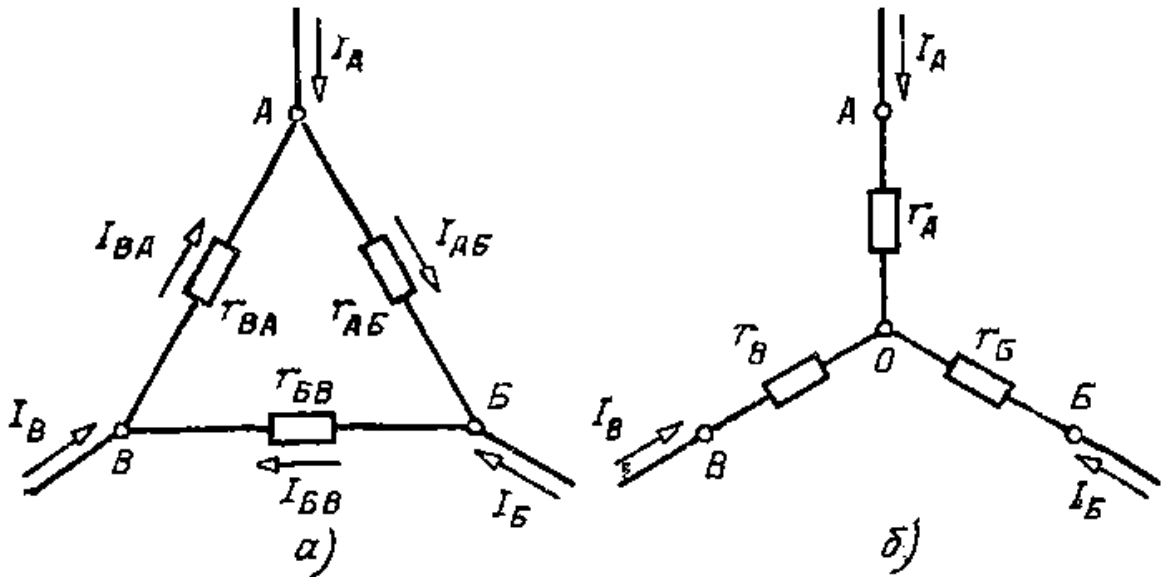


Рис. 2.15 (Соединение треугольником (а) и звездой (б))

Сопротивления эквивалентной звезды r_A , r_B , r_B находятся в определенных соотношениях с сопротивлениями треугольника r_{AB} , r_{BB} , r_{BA} .

$$r_A = \frac{r_{AB} r_{BA}}{r_{AB} + r_{BB} + r_{BA}},$$

$$r_B = \frac{r_{BB} r_{AB}}{r_{AB} + r_{BB} + r_{BA}};$$

$$r_B = \frac{r_{BA} r_{BB}}{r_{AB} + r_{BB} + r_{BA}}.$$

При обратном преобразовании звезды в эквивалентный треугольник

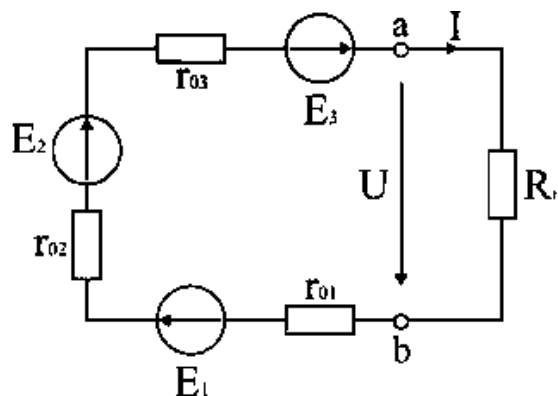
$$r_{AB} = r_A + r_B + r_A r_B / r_C;$$

$$r_{BC} = r_B + r_C + r_B r_C / r_A;$$

$$r_{CA} = r_C + r_A + r_C r_A / r_B.$$

Последовательное и параллельное включение источников питания.

Последовательное включение источников питания (источников ЭДС) применяется тогда, когда требуется создать напряжение требуемой величины, а рабочий ток в цепи меньше или равен номинальному току одного источника ЭДС.



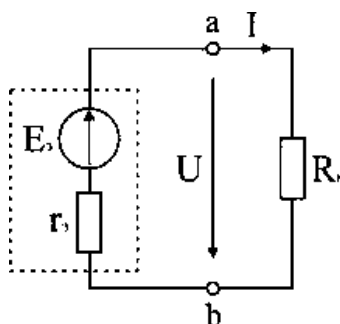
Для этой цепи на основании второго закона Кирхгофа можно записать

$$E_1 + E_2 + E_3 = I(r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_{\text{н}}),$$

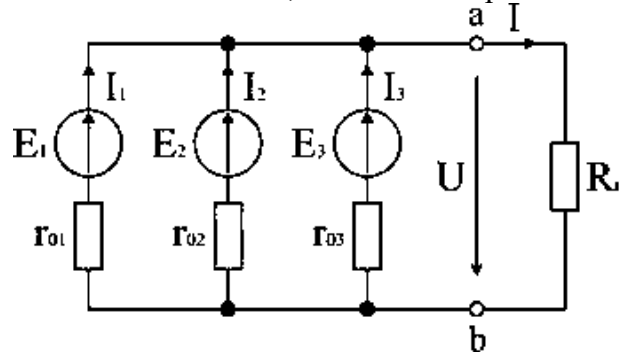
откуда

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_{\text{н}}} = \frac{E_{\Sigma}}{r_{\Sigma} + R_{\text{н}}}$$

Таким образом, электрическая цепь может быть заменена цепью с эквивалентным источником питания, имеющим ЭДС E_{Σ} и внутреннее сопротивление r_{Σ}



При **параллельном соединении источников** соединяются между собой положительные выводы всех источников, а также их отрицательные выводы.



Характерным для параллельного соединения является одно и то же напряжение U на выводах всех источников. Для электрической цепи можно записать

$$I = I_1 + I_2 + I_3; P = P_1 + P_2 + P_3 = UI_1 + UI_2 + UI_3 = UI.$$

Как видно, при параллельном соединении источников ток и мощность внешней цепи равны соответственно сумме токов и мощностей источников. Параллельное соединение источников применяется в первую очередь тогда, когда номинальные ток и мощность одного источника недостаточны для питания потребителей. На параллельную работу включают обычно источники с одинаковыми ЭДС, мощностями и внутренними сопротивлениями.

2.5. Химические источники электрической энергии.

Кроме электромеханических генераторов к источникам электрической энергии для питания цепей постоянного тока относятся гальванические или первичные элементы и аккумуляторы.

а) Гальванические (первичные) элементы. Между электродом и электролитом, в который он погружен, всегда возникает некоторая разность потенциалов, зависящая от материала электрода и состава электролита.

Появление разности потенциалов объясняется тем, что вещество электрода под действием химических сил растворяется в электролите (например, цинк в растворе серной кислоты) и положительные ионы его переходят в электролит. Преобладание отрицательных зарядов на электроде и положительных в прилегающем к нему пограничном слое электролита вызывает появление двойного электрического слоя, а следовательно, и электрического поля на границе электрода, направленного от электролита к электроду. Электрические силы этого поля противодействуют переходу положительных ионов с электрода в раствор. Когда силы электрического поля уравниваются химическими (сторонними по отношению к электрическому полю) силами, растворение цинка прекратится. Возникает разность потенциалов между электродом и электролитом, называемая электродным потенциалом. Помещая в электролит два электрода из равных металлов, получим между ними разность электродных потенциалов — стороннюю ЭДС $E = \varphi_1 - \varphi_2$. Следовательно, устройство, состоящее из двух разнородных электродов, помещенных в электролит, является источником питания — гальваническим или первичным элементом, в котором происходит процесс преобразования (необратимый) химической энергии в электрическую. Большое распространение получили сухие и наливные марганцово-цинковые элементы. Электродвижущая сила элемента $E = 1,5 \text{ В}$.

Номинальным разрядным током элемента называется наибольший длительный ток, допускаемый при его эксплуатации. Емкостью элемента называется количество электричества, выраженное в ампер-часах (А·ч), которое можно получить от элемента за весь период его работы.

б) Аккумуляторы (вторичные элементы). Гальванические элементы, у которых после их разрядки возможен обратный процесс зарядки с преобразованием электрической энергии в химическую, называются аккумуляторами или вторичными элементами.

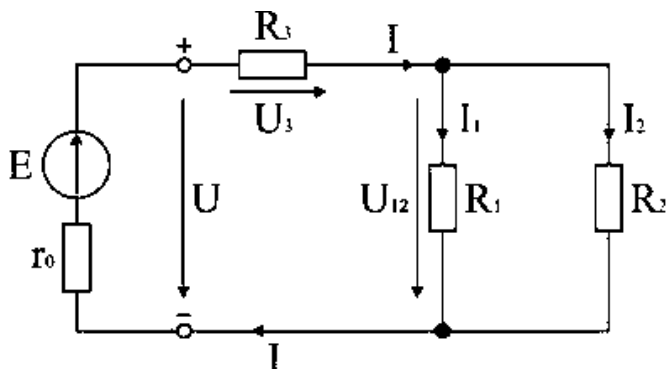
Щелочной аккумулятор получил такое название по электролиту — щелочи, а именно 21 % - ому водному раствору. едкого калия KOH или едкого натрия NaOH. Аккумулятор состоит из двух блоков — пластин, расположенных в стальном сосуде с электролитом. Пластины — это стальные рамки с вставленными в них стальными коробочками, заполненными активной массой. Активная масса отрицательных пластин кадмиево-никелевых элементов состоит из губчатого кадмия, а железо-никелевых — из губчатого железа. Активная масса положительных пластин у обоих аккумуляторов состоит из гидрата окиси никеля Ni(OH)_3 .

Кислотный (свинцовый) аккумулятор состоит из двух блоков пластин погруженных в электролит (25 – 30 %-ный водный раствор серной кислоты). Положительные пластины из свинца для увеличения поверхности соприкосновения с электролитом имеют ребристую поверхность или выполнены из свинцовых каркасов, заполненных активной массой (перекись свинца). Отрицательные пластины представляют собой свинцовые каркасы, заполненные губчатым свинцом.

КПД свинцового аккумулятора $0,75 - 0,8$, щелочного $0,5 - 0,6$. Ток короткого замыкания свинцового аккумулятора очень велик. Щелочные, имеют меньшую чувствительность к коротким замыканиям. Это объясняется большим внутренним сопротивлением щелочного аккумулятора. Щелочные аккумуляторы имеют большую механическую прочность, больший срок службы и меньшую требовательность к уходу, по сравнению с кислотными.

2.6. Примеры решения задач к разделу 2.

Задача 1. Расчет цепи с одним источником питания.



В цепи, схема которой приведена на рисунке, ЭДС аккумуляторной батареи $E = 78$ В, ее внутреннее сопротивление $r_0 = 0,5$ Ом. Сопротивления резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 5$ Ом, $R_3 = 4$ Ом. Вычислить токи во всех ветвях цепи и напряжения на зажимах батареи и на каждом из резисторов.

Решение.

1. Обозначение токов и напряжений на участках цепи.

Резистор R_3 включен последовательно с источником, поэтому ток I для них будет общим, токи в резисторах R_1 и R_2 обозначим соответственно I_1 и I_2 . Аналогично обозначим напряжения на участках цепи.

2. Определение эквивалентного сопротивления цепи:

$$R_3 = r_0 + R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 0,5 + 4 + 5 \cdot 10 / (5 + 10) = 7,8 \text{ Ом}$$

3. Ток в цепи источника рассчитываем по закону Ома:

$$I = E / R_3 = 78 / 7,8 = 10 \text{ А.}$$

4. Определение напряжений на участках цепи:

$$U_{12} = R_{12} I = 3,3 \cdot 10 = 33 \text{ В}; U_3 = R_3 I = 4 \cdot 10 = 40 \text{ В};$$

$$U = E - r_0 I = 78 - 0,5 \cdot 10 = 73 \text{ В.}$$

5. Определение токов и мощностей всех участков:

$$I_1 = U_{12} / R_1 = 33 / 10 = 3,3 \text{ А}; I_2 = U_{12} / R_2 = 33 / 5 = 6,6 \text{ А};$$

$$P_1 = R_1 I_1^2 = U_{12} I_1 = 108,9 \text{ Вт}; P_2 = R_2 I_2^2 = U_{12} I_2 = 217,8 \text{ Вт};$$

$$P_3 = R_3 I^2 = U_3 I = 400 \text{ Вт.}$$

Мощность потерь на внутреннем сопротивлении источника

$$\Delta P = r_0 I^2 = 50 \text{ Вт.}$$

$$\text{Мощность источника } P = E I = 780 \text{ Вт.}$$

Дополнительные вопросы к задаче 1.

1. Как проверить правильность решения задачи?

Правильность вычисления токов можно проверить, составив уравнение на основании первого закона Кирхгофа: $I = I_1 + I_2$.

Правильность расчета мощностей проверяют по уравнению баланса мощностей: $P = P_1 + P_2 + P_3 + \Delta P$.

2. Каким будет напряжение на зажимах источника, при обрыве в цепи резистора R_3 ?

Это будет режим холостого хода источника ЭДС, при котором $U = E$, т.к. ток I равен 0 и $I r_0 = 0$.

3. Каким будет ток в цепи источника при коротком замыкании на его зажимах?

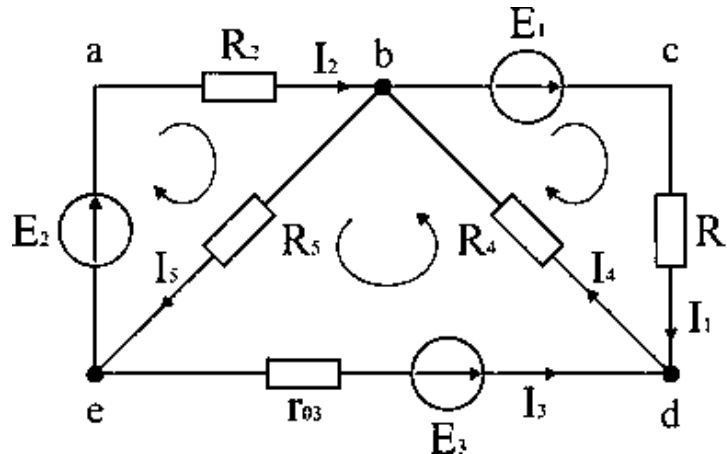
В режиме короткого замыкания $U = 0$ и ток источника ограничивается только его внутренним сопротивлением

$$I_{кз} = E / r_0 = 78 / 0,5 = 156 \text{ А.}$$

4. Как изменятся токи в схеме при увеличении R_1 ?

При увеличении R_1 увеличивается сопротивление параллельного участка схемы R_{12} , поэтому увеличивается сопротивление $R_{экв}$, что приводит к уменьшению тока I . При уменьшении I уменьшаются падения напряжения $I R_3$ и $I r_0$ и, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, напряжение на разветвлении $U_{12} = E - I (R_3 + r_0)$ возрастает, что приводит к увеличению тока в резисторе R_2 . Т.к. ток I уменьшается, а ток I_2 возрастает, ток $I_1 = I - I_2$ уменьшается.

Задача 2. Расчет сложных цепей при помощи уравнений Кирхгофа.



Рассчитать схему на рисунке, составив систему уравнений на основании законов Кирхгофа.

Исходные данные к задаче:

$$E_1 = 60 \text{ В}; E_2 = 80 \text{ В}; E_3 = 70 \text{ В};$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом}; R_2 = 50 \text{ Ом}; r_{03} = 5 \text{ Ом}; R_4 = 65 \text{ Ом}; R_5 = 85 \text{ Ом}.$$

Решение.

1. Определение необходимого числа уравнений.

В схеме пять ветвей и для расчета токов в них надо составить пять уравнений. По первому закону Кирхгофа составляются уравнения для всех узлов, кроме одного (уравнение для него будет следствием предыдущих), по второму – для независимых контуров (в каждый последующий контур входит хотя бы одна ветвь, не вошедшая в ранее рассмотренные). Для данной схемы надо составить два уравнения по первому закону и три – по второму.

2. Составление и решение системы уравнений.

Для составления уравнений задаемся произвольно направлениями токов в ветвях и направлениями обхода контуров.

$$\text{Уравнение для узла d: } I_1 + I_3 - I_4 = 0.$$

$$\text{Уравнение для узла e: } -I_2 - I_3 + I_5 = 0.$$

$$\text{Уравнение для контура bcd: } I_1 R_1 + I_4 R_4 = E_1.$$

$$\text{Уравнение для контура abe: } I_2 R_2 + I_5 R_5 = E_2.$$

$$\text{Уравнение для контура bde: } I_3 r_{03} + I_4 R_4 + I_5 R_5 = E_3.$$

Подставив в уравнения численные значения величин, получим алгебраическую систему уравнений:

$$I_1 + I_3 - I_4 = 0;$$

$$-I_2 - I_3 + I_5 = 0;$$

$$20 I_1 + 65 I_4 = 60;$$

$$50 I_2 + 85 I_5 = 80;$$

$$5 I_3 + 65 I_4 + 85 I_5 = 70.$$

Решение системы дает значения токов: $I_1 = 1,093 \text{ A}$; $I_2 = 0,911 \text{ A}$; $I_3 = -0,506 \text{ A}$; $I_4 = 0,587 \text{ A}$; $I_5 = 0,405 \text{ A}$.

Дополнительные вопросы к задаче 2.

1. Что означает минус перед численным значением тока I_3 ?

Знак «—» говорит о том, что реальное направление тока в данной ветви противоположно принятому в начале расчета.

2. В каких режимах работают элементы схемы, содержащие источники ЭДС?

В ветвях с E_1 и E_2 токи совпадают по направлению с ЭДС, т.е. данные элементы работают источниками, отдавая энергию в схему; в ветви с ЭДС E_3 ток направлен против ЭДС, т.е. данный элемент работает потребителем (например, машина постоянного тока в режиме двигателя).

3. Как проверить правильность решения задачи?

Для проверки правильности расчета можно на основании законов Кирхгофа написать уравнения для узлов и контуров схемы, которые не использовались при составлении исходной системы. Независимой проверкой является уравнение баланса мощностей: сумма мощностей источников равна сумме мощностей, расходуемых в резистивных элементах схемы. Т.к. элемент схемы с ЭДС может работать как в режиме источника, так и в режиме потребителя, соответствующее слагаемое в левой части уравнения берется с плюсом, если E и I совпадают по направлению (источник), и с минусом, если направления противоположны (потребитель).

Мощности элементов схемы с ЭДС:

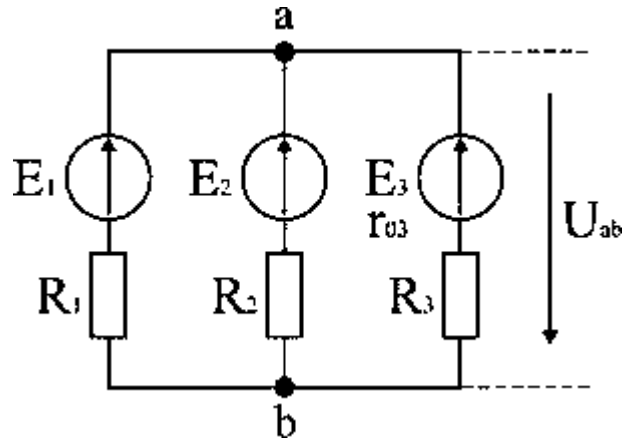
$$E_1 I_1 + E_2 I_2 - E_3 I_3 = 60 \cdot 1 \cdot 1,093 + 80 \cdot 0,911 - 70 \cdot 0,506 = 104,04 \text{ Вт.}$$

Мощности, расходуемые в резистивных элементах схемы:

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 = 1,093^2 \cdot 20 + 0,911^2 \cdot 50 + 0,506^2 \cdot 5 + 0,587^2 \cdot 65 + 0,405^2 \cdot 85 = 103,01 \text{ Вт}$$

$\Sigma EI = \Sigma P$ Баланс мощностей сошелся, следовательно задача решена верно.

Задача 3. Расчет цепи методом узлового напряжения.



В схеме рисунке $E_1 = 60 \text{ В}$, $E_2 = 48 \text{ В}$, $E_3 = 6 \text{ В}$, $R_1 = 200 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $r_{03} = 0,5 \text{ Ом}$, $R_3 = 9,5 \text{ Ом}$. Определить токи в ветвях схемы.

Решение.

1. Вычисление узлового напряжения. Для схемы с двумя узлами напряжение между ними можно подсчитать по формуле

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3},$$

где E_i – ЭДС i -й ветви, g_i – ее проводимость $\left(g_i = \frac{1}{R_i} \right)$.

Подставляем числовые значения:

$$U_{ab} = \frac{60/200 + 48/100 + 6/(0,5 + 9,5)}{1/200 + 1/100 + 1/(0,5 + 9,5)} = 12$$

2. Расчет токов в ветвях

Токи определяем на основании закона Ома для ветви с источником: напряжение на зажимах источника равно его ЭДС минус падение напряжения на его внутреннем сопротивлении:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{60 - 12}{200} = 0,24$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2} = \frac{48 - 12}{100} = 0,36$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{ab}}{r_{03} + R_3} = \frac{6 - 12}{0,5 + 9,5} = -0,6$$

Дополнительные вопросы к задаче 3.

1. Как повлияет на порядок расчета изменение полярности ЭДС в одной из ветвей схемы?

В формуле узлового напряжения и при расчете тока в этой ветви данную ЭДС надо брать со знаком «минус».

2. В каких режимах работают источники схемы?

По результатам расчета $U_{ab} < E_1$, $U_{ab} < E_2$, т.е. эти элементы схемы работают источниками; т.к. $U_{ab} > E_3$, т.к. в третьей ветви направлен против E_3 и принятого перед началом расчета направления I_3 , т.е. этот элемент схемы работает в режиме потребления энергии.

3. В каких режимах будут работать источники, если за счет изменения величины ЭДС E_3 увеличить узловое напряжение U_{ab} до 48 В?

Увеличением E_3 можно установить $U_{ab} = 48 \text{ В} = E_2$, при этом ток I_2 будет равен нулю (режим холостого хода), источник E_1 вырабатывает энергию, E_3 – потребляет. Ток в схеме и необходимую величину E_3 определим на основании второго закона Кирхгофа:

$$I_1 = -I_3 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{60 - 48}{200} = 0,06$$

$$E_3 = U_{ab} + I_3 (r_{03} + R_3) = 48 - 0,06 \cdot 10 = 47,4$$

2.7. Тесты для самоконтроля по разделу 2.

1. Что называется электрическим током ?

- А) разность потенциалов между точками электрического поля
- Б) сила, с которой электрическое поле действует на электрический заряд
- В) упорядоченное движение заряженных частиц в проводнике
- Г) материя, скользящая по проводнику

2. Единицей измерения электрической проводимости является

- А) Ампер
- Б) Ватт
- В) Фарад
- Г) Сименс

3. Укажите формулу соответствующую закону Ома для участка цепи

- А) $I = U/R$
- Б) $R = U \cdot I$
- В) $U = A/q$
- Г) верный ответ не приведён

4. Узел электрической цепи это

- А) место соединения трёх и более ветвей
- Б) место соединения резисторов
- В) место соединения конденсаторов
- Г) верный ответ не приведён

5. Единицей измерения силы тока является

- А) Вольт
- Б) Ампер
- В) Ом
- Г) Генри

6. Единицей измерения электрической мощности является

- А) Вольт
- Б) Ватт
- В) Сименс
- Г) Тесла

7. Единицей измерения электрического напряжения является

- А) Ампер
- Б) Ватт
- В) Фарад
- Г) Вольт

8. Устройство, которое включается в электрическую цепь для ограничения или регулирования тока называется

- А) источником энергии
- Б) резистором
- В) реостатом
- Г) конденсатором

9. При соединении элементов питания в батарею последовательно

- А) увеличивается разрядный ток батареи
- Б) эквивалентное напряжение равно сумме напряжений последовательно соединённых элементов
- В) эквивалентное напряжение равно напряжению одного элемента питания
- Г) нет верного ответа

10. Формула электрической мощности соответствует выражению

- А) $P = U/R$
- Б) $P = U/I$
- В) $P = UI$
- Г) $P = UR$

11. Формулировка первого закона Кирхгофа гласит

- А) алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в отдельных сопротивлениях этого контура
- Б) алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю
- В) ток в электрической цепи прямо пропорционален ЭДС и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи

12. Закону Джоуля –Ленца соответствует формула

- А) $I = U/R$
- Б) $P = U/I$
- В) $Q = I^2 \cdot r \cdot t$
- Г) $P = UI$

13. Формулировка второго закона Кирхгофа гласит

- А) алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в отдельных сопротивлениях этого контура
- Б) алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю
- В) ток в электрической цепи прямо пропорционален ЭДС и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи
- Г) нет верного ответа

14. Формулировка закона Ома для полной цепи гласит

- А) алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в отдельных сопротивлениях этого контура
- Б) алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю
- В) ток в электрической цепи прямо пропорционален ЭДС и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи
- Г) нет верного ответа

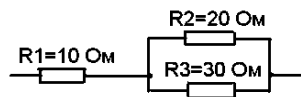
15. Сила тока в цепи 2 А при напряжении на её концах 5 В. Найдите сопротивление цепи

- А) 10 Ом
- Б) 0,4 Ом
- В) 2,5 Ом
- Г) 4 Ом

16. Определите сопротивление нити электрической лампы мощностью 100 Вт, если лампа рассчитана на напряжение 220 В

- А) 570 Ом
- Б) 484 Ом
- В) 523 Ом
- Г) 446 Ом

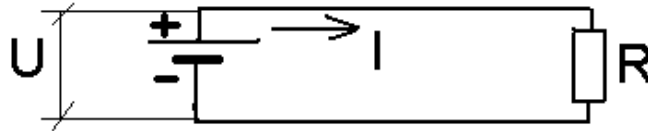
17. Найти эквивалентное сопротивление цепи



- А) 35 Ом
- Б) 60 Ом
- В) 22 Ом

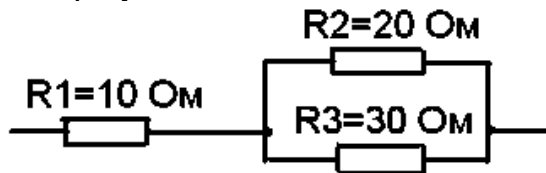
2.8. Задания для самоконтроля по разделу 2.

1. На схеме собрана цепь, состоящая из источника тока и резистора.



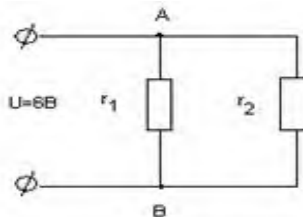
Напряжение на клеммах источника $U=50$ В. Резистор выполнен из нихромовой проволоки длиной 10 м и диаметром 0,5 мм. Удельное сопротивление нихрома 10^{-6} Ом·м. Определить силу тока в цепи. Определить сопротивление резистора при увеличении температуры на 100 °С. Температурный коэффициент сопротивления нихрома 10^{-4} 1/°С. Найти плотность тока в проводах, соединяющих элементы цепи, если их диаметр 1 мм.

2. Найти сопротивление цепи на рисунке.

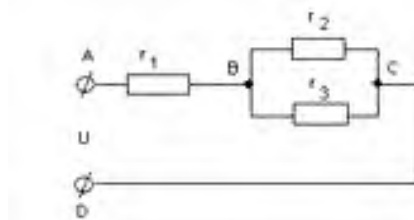


3. Рассчитать силу тока, проходящую по медному проводу длиной 100 м, площадью поперечного сечения $0,5 \text{ мм}^2$, если к концам провода приложено напряжение 6,8 В. Удельное сопротивление меди $0,017$ Ом мм²/м

4. Два резистора сопротивлением $r_1 = 5$ Ом и $r_2 = 30$ Ом включены, как показано на рисунке, к зажимам источника тока напряжением 6 В. Найдите силу тока на всех участках цепи.



5. Определите полное сопротивление цепи и токи в каждом проводнике, если проводники соединены так, как показано на рисунке, $r_1=1$ Ом, $r_2=2$ Ом, $r_3=3$ Ом, $U_{AC} = 11$ В



6. Рассчитайте, сколько стоит электроэнергия, израсходованная на работу электрического утюга за 2 часа? Сила тока 4 А, напряжение 220 В, тариф — 24,6 коп. за 1 кВт·ч.

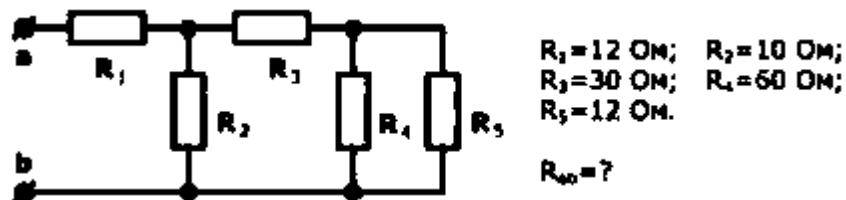
7. В сеть с напряжением $U=218$ В, включен нагревательный прибор сила тока, которого 2,75 А. Определить мощность прибора и количество энергии, израсходованной за 3 часа.

8. Определить ЭДС генератора и его внутреннее сопротивление, если при мощности нагрузки $P_1=2,7$ кВт напряжение на зажимах генератора 225 В, при мощности нагрузки $P_2=1,84$ кВт напряжение 230 В.

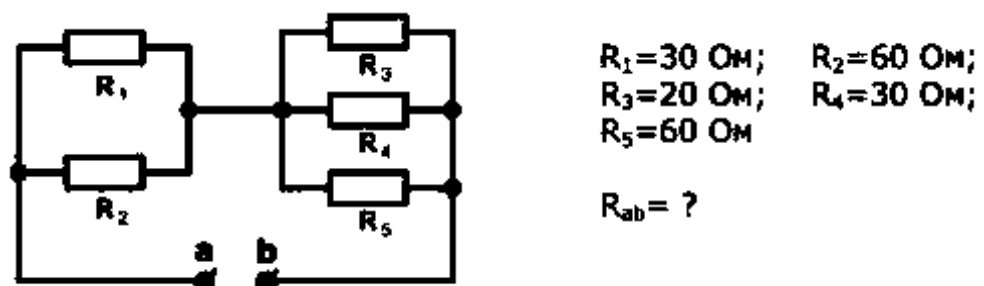
9. Двухпроводная линия питается от источника мощностью $P_{\Gamma} = 2,5$ кВт при токе потребления 12 А. Определить мощность нагрузки, потерю напряжения и КПД линии, если её длина составляет $l=1200$ м, а диаметр медных проводов $d=4,5$ мм (удельное сопротивление меди $0,0175$ Ом·мм²/м).

10. В цепь с напряжением 120 В включено 25 ламп по 150 Вт. Определить сечение медных проводов для установки используя таблицу в разделе 2.2.

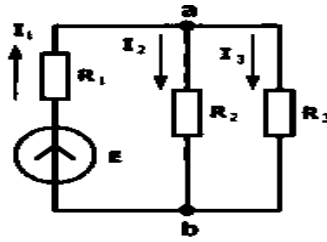
11. Найти эквивалентное сопротивление между зажимами а и в для цепи на рисунке.



12. Найти эквивалентное сопротивление для цепи на рисунке между зажимами а и в.

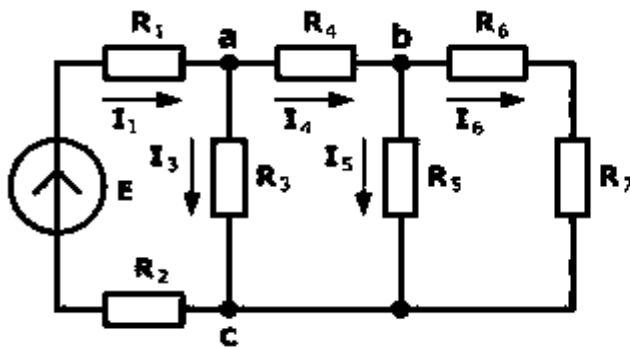


13. Найти ток во всех ветвях цепи.



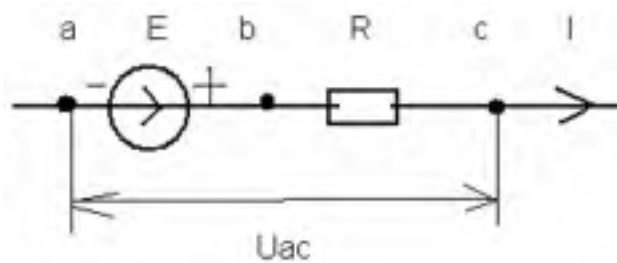
$E=120 \text{ В};$
 $R_1=36 \text{ Ом}; R_2=60 \text{ Ом};$
 $R_3=40 \text{ Ом}$
 $I_1, I_2, I_3 = ?$

14. Найти токи во всех ветвях цепи по схеме.

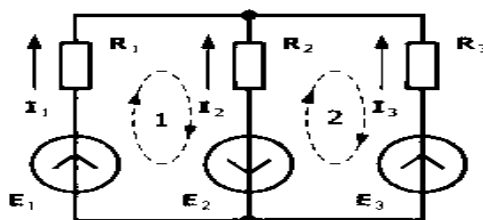


$E=120 \text{ В};$
 $R_1=R_2=0,5 \text{ Ом}; R_3=6 \text{ Ом}$
 $R_4=R_6=1 \text{ Ом}; R_5=6 \text{ Ом};$
 $R_7=2 \text{ Ом}$
 $I_1, I_3, I_4, I_5, I_6 = ?$

15. Найти напряжение U_{ac} , если $E=70 \text{ В}$ $I=3 \text{ А}$ $R=10 \text{ Ом}$

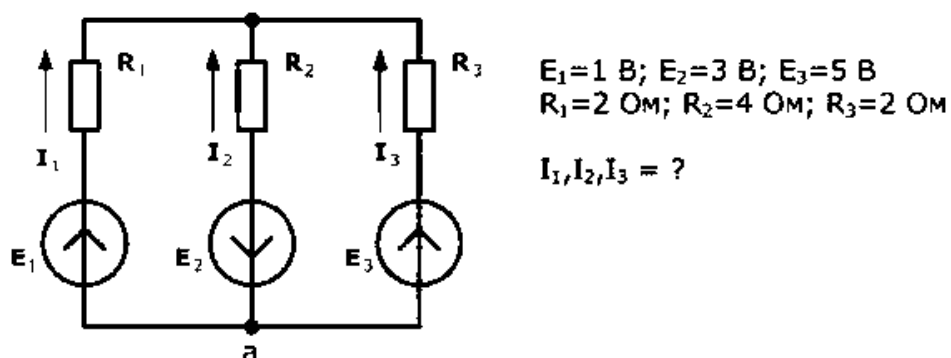


16. Определить значения токов во всех ветвях цепи методом уравнений Кирхгофа.

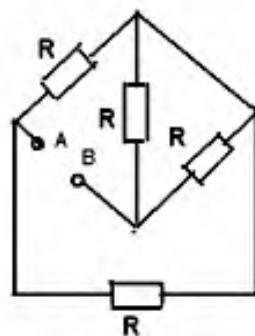


$E_1=1 \text{ В}; E_2=3 \text{ В}; E_3=5 \text{ В}$
 $R_1=2 \text{ Ом}; R_2=4 \text{ Ом}; R_3=2 \text{ Ом}$
 $I_1, I_2, I_3 = ?$

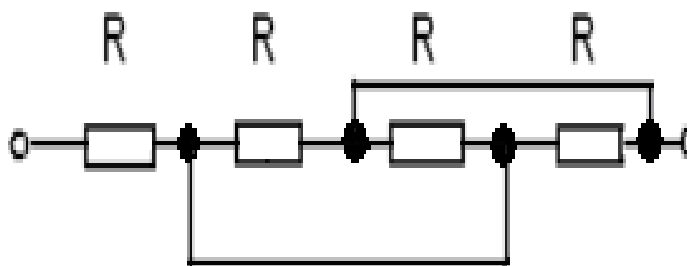
17. Определить значения токов во всех ветвях цепи методом узловых напряжений.



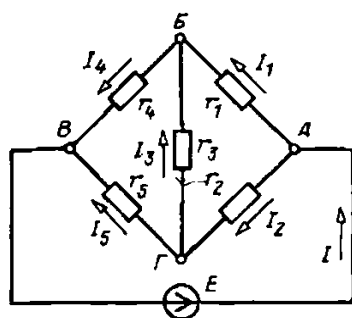
18. Найти входное эквивалентное сопротивление. $R=5 \text{ Ом}$



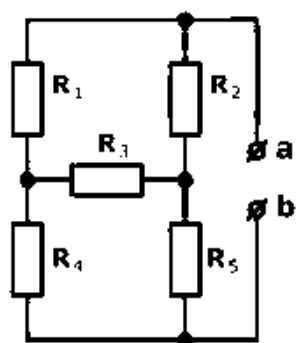
19. Найти сопротивление схемы $R=6 \text{ Ом}$



20. Определить токи в ветвях мостовой схемы, если известны параметры цепи: $E = 4,4 \text{ В}$, $r_1 = 20 \text{ Ом}$, $r_2 = 60 \text{ Ом}$, $r_3 = 120 \text{ Ом}$, $r_4 = 8 \text{ Ом}$, $r_5 = 44 \text{ Ом}$.



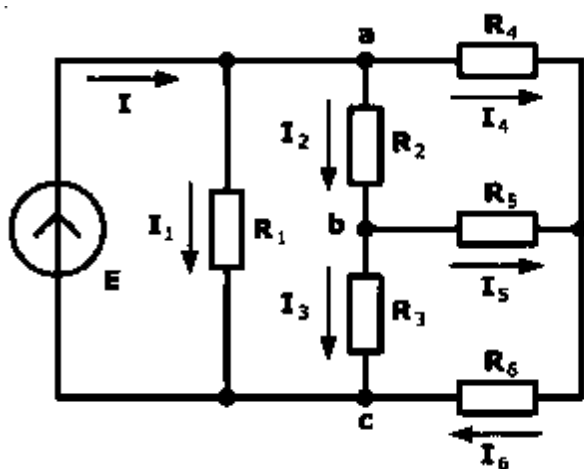
21. Найти эквивалентное сопротивление для следующей цепи между зажимами а и б.



$R_1 = 10 \text{ Ом};$ $R_2 = 30 \text{ Ом};$
 $R_3 = 60 \text{ Ом};$ $R_4 = 14 \text{ Ом};$
 $R_5 = 2 \text{ Ом}$

$R_{ab} = ?$

22. (СЛОЖНАЯ) В электрической цепи определить токи всех ветвей. Проверить решение составлением баланса мощностей



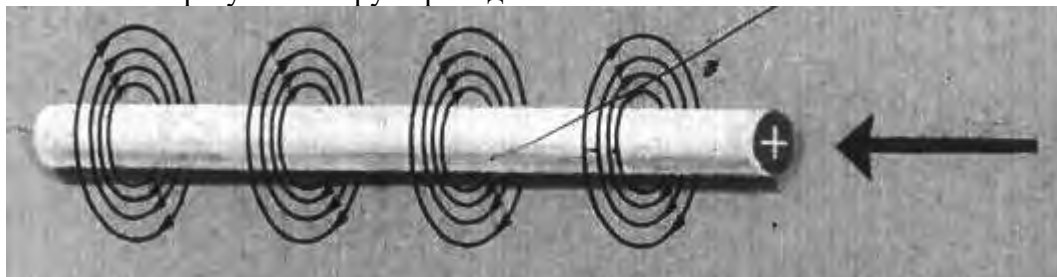
$E = 20 \text{ В};$
 $R_1 = 4 \text{ Ом};$ $R_2 = 2 \text{ Ом};$
 $R_3 = 5 \text{ Ом};$ $R_4 = 1 \text{ Ом};$
 $R_5 = 4 \text{ Ом};$ $R_6 = 1 \text{ Ом}$

$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6 - ?$

3. Электромагнетизм.

3.1. Магнитное поле постоянного тока.

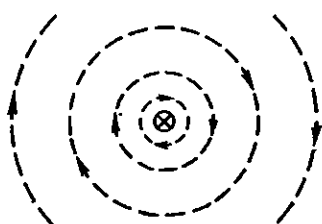
Магнитное поле образуется вокруг проводника стоком.



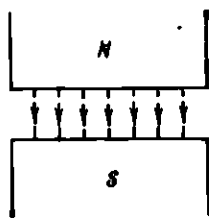
Для обнаружения **магнитного поля** используют магнитную стрелку. Магнитная стрелка, внесённая в магнитное поле провода с током испытывает действие сил этого поля и стремится расположиться перпендикулярно оси этого провода. Магнитное поле возникает не только вокруг проводника с током, но и при движении любых электрически заряженных частиц и тел.

Направление, которое указывает северный конец магнитной стрелки, принимается за **направление магнитного поля**.

Для графического изображения магнитного поля используются **магнитные линии**. Они проводятся так, чтобы направление в каждой её точке, совпадало с направлением поля. **Магнитные линии всегда замкнуты.**



Магнитные линии провода с током.



Магнитные линии постоянного магнита.



Магнитные линии катушки



Магнитные линии витка с током

Направление магнитных линий определяют по **правилу винта (буравчика)**.



Андре Ампер (1775-1836)

Если поступательное движение буравчика совместить с направлением тока в проводнике, то направление движения рукоятки укажет направление магнитных линий.

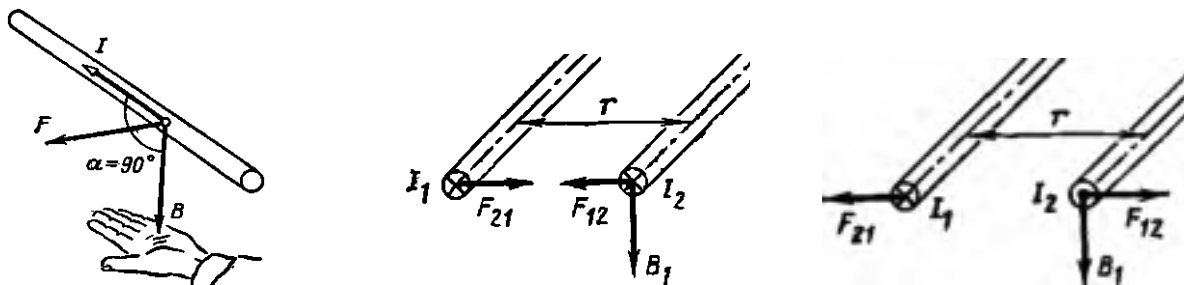
В случае витка или катушки, если совместить направление движения рукоятки с направлением тока в витке, то поступательное движение буравчика укажет направление магнитных линий.

Магнитное поле действует на провод с током с силой F , которая называется **электромагнитной силой**. Если направление вектора силы F перпендикулярно направлению вектора индукции B и направлению тока I , то сила определяется по формуле

$$F = I B l$$

где l — длина провода.

Направление силы определяется по **правилу левой руки**.



Если, расположить левую ладонь так, чтобы вектор магнитной индукции входил в неё, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока, то отогнутый большой палец укажет направление электромагнитной силы.

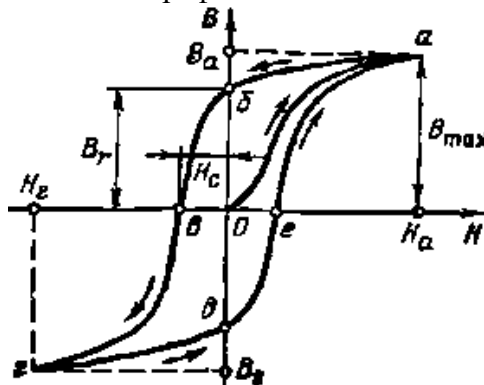
Если угол между направлением тока и вектором индукции не равен 90 град, то

$$F = I B l \sin \alpha$$

Если два проводника расположены параллельно, то они либо притягиваются, либо отталкиваются с силой

$$F_{21} = F_{12} = \mu_0 \cdot l \cdot I_1 \cdot I_2 / 2\pi r,$$

где μ_0 **абсолютная магнитная проницаемость**, учитывает влияние среды. В которой находятся провода. Измеряется в **генри на метр (Гн/м)**. Магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Для всех сред кроме **ферромагнитных материалов** магнитная проницаемость не зависит от величины и направления тока (линейная среда). Для ферромагнитных график зависимости имеет вид петли гистерезиса.



Величина

$$B_1 = \mu_0 I_1 / 2\pi r$$

характеризующая интенсивность магнитного поля называется **магнитной индукцией**. Измеряется в **Тесла (Тл)**. $1 \text{ Тл} = \text{Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$.

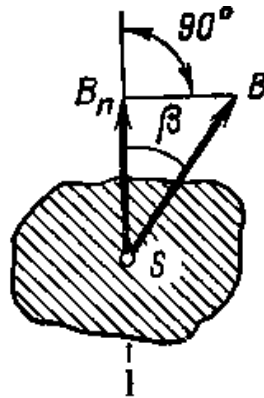
Тогда сила

$$F_{12} = B_1 \cdot (I_2 \cdot l)$$

Магнитный поток характеризует плотность магнитного поля и определяется по формуле

$$\Phi = B S \cos \beta$$

где β угол между вектором магнитной индукции и площадкой S . Единица измерения магнитного потока **Вебер (Вб)**. $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ м}^2$. Более мелкая единица максвелл. $1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$.



Потокосцепление численно равно сумме магнитных потоков, проходящих через каждый виток катушки, т.е. при количестве витков N и одинаковом магнитном потоке в каждом витке потокосцепление можно определить как

$$\Psi = N \Phi_1,$$

где Φ_1 магнитный поток одного витка. Измеряется в Веберах.

Доля намагничивающей силы, приходящейся на единицу длины магнитной линии называется напряжённостью магнитного поля и выражается формулой

$$H = I / l = I / (2\pi r)$$

где l – длина магнитной линии радиуса r .

Единица измерения напряжённости ампер на метр (А/м).

3.2. Электромагнитная индукция.

В проводе, который при движении в магнитном поле пересекает магнитные линии, возбуждается ЭДС, получившая название **ЭДС электромагнитной индукции**, а само явление названо **электромагнитной индукцией**.

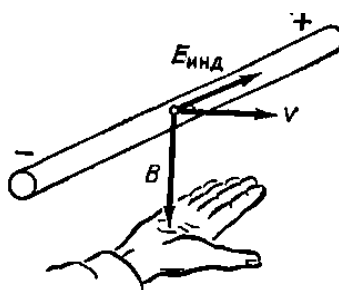
Напряжённость электрического поля индукции (v – скорость движения проводника)

$$E_{\text{и}} = B \cdot v$$

ЭДС электромагнитной индукции (l – длина провода)

$$E = E_{\text{и}} l = B l v$$

Это закон электромагнитной индукции. ЭДС электромагнитной индукции пропорциональна магнитной индукции поля, длине провода и скорости его движения.



Направление наведённой ЭДС определяется **правилом правой руки**. Если ладонь правой руки, расположить так, чтобы магнитные линии входили в неё, а отогнутый большой палец указывал на направление движения провода, то вытянутые четыре пальца укажут на направлении индуктивной ЭДС.

Если вектор скорости не перпендикулярен вектору магнитной индукции, то

$$E = B l v \sin \alpha$$

Для определения действительного направления наведённой ЭДС, применяют **правило Ленца**. Ток, возникающий в контуре, под действием наведённой ЭДС, всегда направлен т.о., что противодействует изменению магнитного потока, пронизывающего контур.

Токи возникают и в телах, расположенных в изменяющемся магнитном поле (например, сердечник катушки). Они называются **вихревыми токами**. Они создают своё магнитное поле, оказывающее размагничивающее действие, на полезное поле. А так же нагревая сердечник, вызывают не нужный расход энергии и снижают КПД механизма. Это **потери от вихревых токов**.

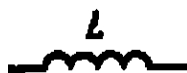
Вокруг замкнутого контура с током всегда существует магнитный поток, пронизывающий контур. Его называют **потокосцеплением самоиндукции**. Сумма потоков витков катушки называют **потокосцеплением самоиндукции**. Связь

потокосцепления самоиндукции с током в данной цепи характеризуется **индуктивностью**.

$$L = \Psi / I$$

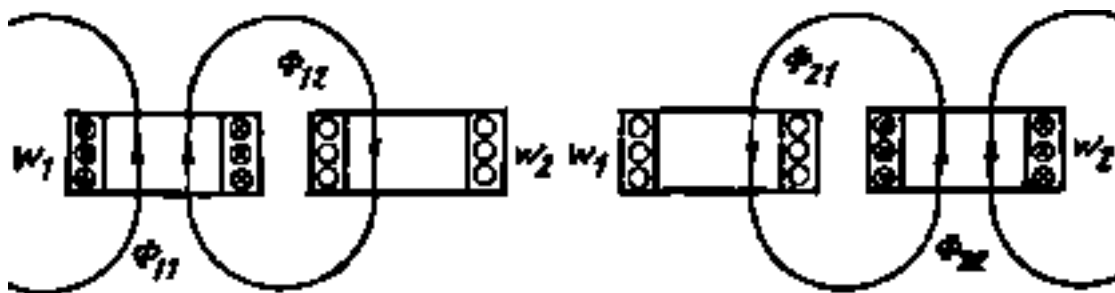
Единица измерения индуктивности Генри (Гн).

Условное обозначение катушки индуктивности на схеме.



Изменение потокосцепления самоиндукции влечёт возникновение **ЭДС самоиндукции**.

Два контура (катушки) называются магнитносвязанными, если часть магнитного потока, созданного током первого контура, пронизывают второй контур и наоборот.



Взаимная индуктивность

$$M_{12} = \Psi_{12} / I_1 = w_2 \Phi_{12} / I_1 \quad M_{21} = \Psi_{21} / I_2 = w_1 \Phi_{21} / I_2$$

$$M = M_{12} = M_{21}$$

ЭДС, возникающая в катушках называется **ЭДС взаимоиндукции**, а само явление **взаимоиндукцией**.

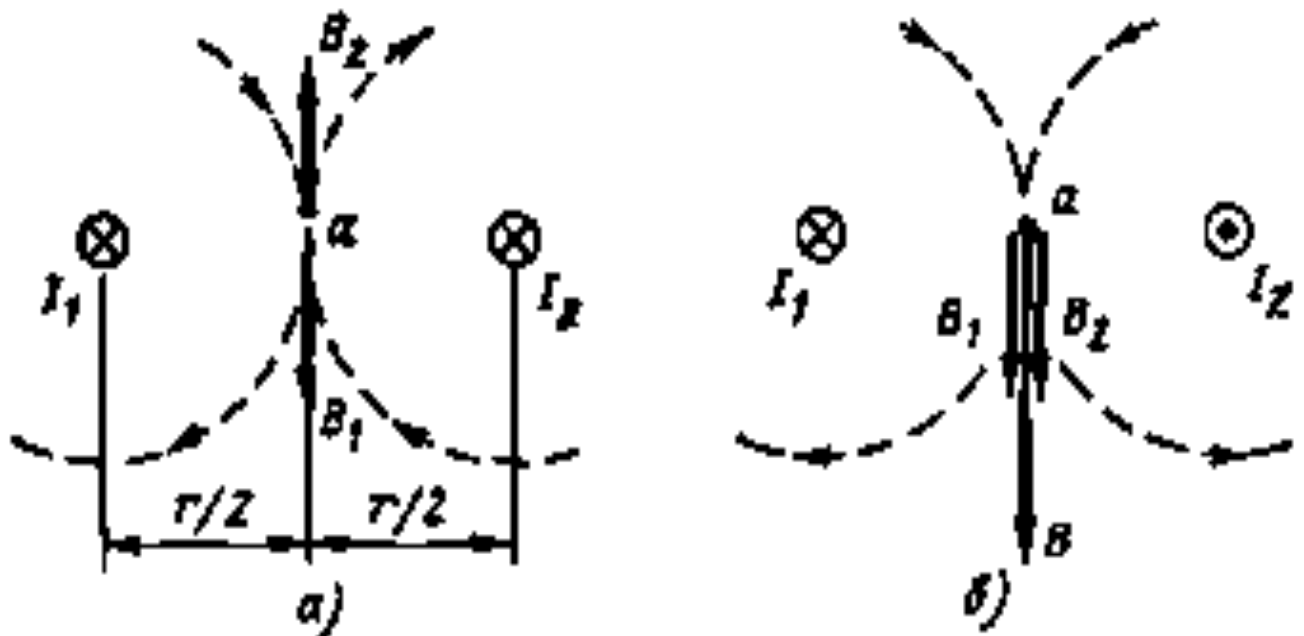
На явлении взаимоиндукции основана работа трансформатора. Трансформатор это электрическая машина, состоящая из набора индуктивно связанных обмоток на каком-либо магнитопроводе или без него и предназначенная для преобразования посредством взаимоиндукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока без изменения частоты систем(системы) переменного тока. Трансформатор осуществляет преобразование напряжения переменного тока и/или гальваническую развязку в самых различных областях применения — электроэнергетике, электронике и радиотехнике. Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного материала.

3.3. Тесты для самоконтроля по разделу 3.

1. В чём заключается сущность явления самоиндукции ?
 - А) в возникновении тока в катушке при изменении тока в соседней катушке
 - Б) в возникновении ЭДС в проводнике под действием магнитного поля
 - В) в возникновении тока в катушке при изменении тока в ней
 - Г) в образовании магнитного поля вокруг проводника с током
2. Магнитный поток обозначают буквой
 - А) В
 - Б) I
 - В) Ф
 - Г) Н
3. Назначением трансформатора является
 - А) преобразование переменного тока в постоянный
 - Б) преобразование частоты переменного тока
 - В) преобразование энергии переменного тока из одного напряжения в другое
 - Г) повышение мощности
4. Единицей измерения магнитной индукции является
 - А) ампер · виток
 - Б) ампер / метр
 - В) вебер;
 - Г) тесла.
5. Абсолютная магнитная проницаемость учитывает
 - А) влияние температуры
 - Б) влияние среды
 - В) влияние внешних сил
 - Г) влияние внешнего поля
6. По правилу левой руки определяют
 - А) направление движения
 - Б) направление главного удара
 - В) направление электродвижущей силы
 - Г) направление электромагнитной силы
7. По правилу буравчика определяют
 - А) направление электромагнитной силы
 - Б) направление магнитных линий
 - В) направление электродвижущей силы
 - Г) нет верного ответа

3.4. Задания для самоконтроля по разделу 3.

1. Токи в двух параллельных проводах радиуса 2мм одинаковые $I_1 = I_2 = 2\text{А}$. Расстояние между проводами $r = 10\text{см}$. Найти значение и направление вектора индукции в вакууме в точке а на расстоянии $r/2$ от каждого провода при а) одинаковых и б) противоположных направлениях токов. Магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.



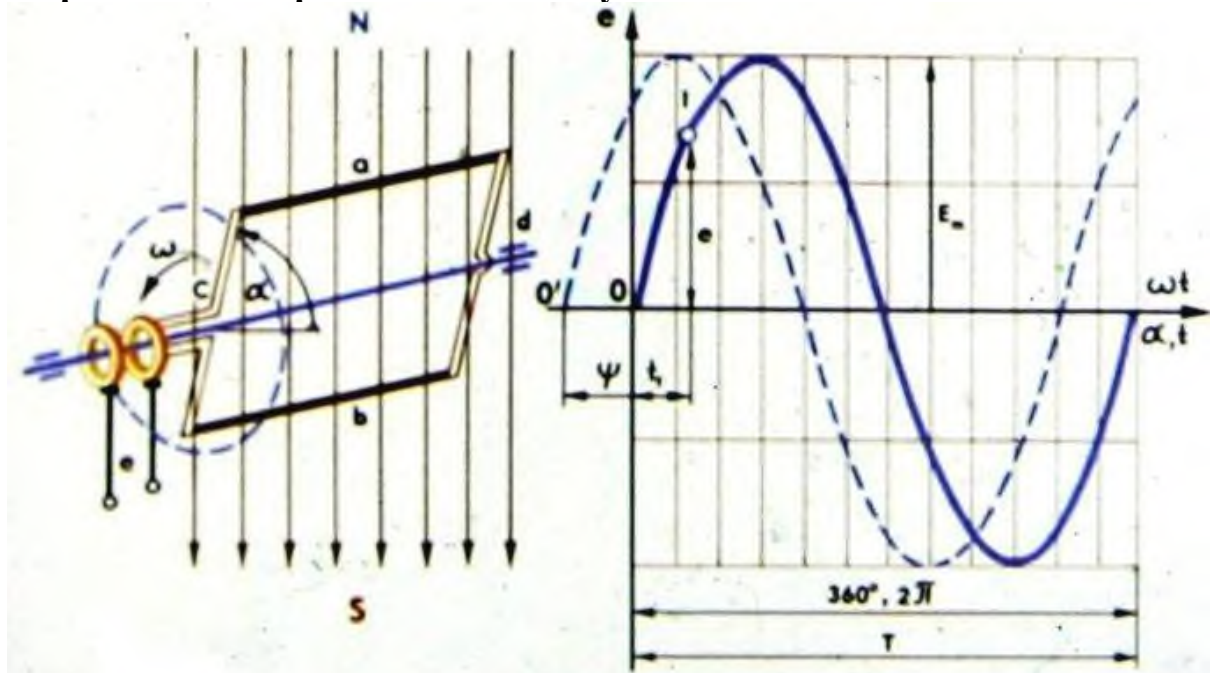
2. Определить индуктивность кольцевой катушки при среднем радиусе магнитопровода катушки $r_{\text{ср}} = (r_1 + r_2)/2$, значительно большим радиуса витков катушки. В этом случае среднее значение магнитной индукции в поперечном сечении магнитопровода можно считать равным значению магнитной индукции на осевой линии катушки. Сердечник выполнен из электротехнической стали. Относительная магнитная проницаемость электротехнической стали равна 4000. В катушке 2000 витков. Площадь сечения катушки $0,0001 \text{ м}^2$. Длина провода 80 м.

4. Электрические цепи переменного однофазного тока.

4.1. Синусоидальный электрический ток.

Переменный ток, это электрический ток, изменяющийся во времени. Обычно в технике под переменным током понимают периодический ток, в котором среднее значение за период силы тока и напряжения равно нулю.

Синусоидальным называется переменный ток, графиками тока и напряжения которого является синусоида.



Получение однофазного переменного тока.

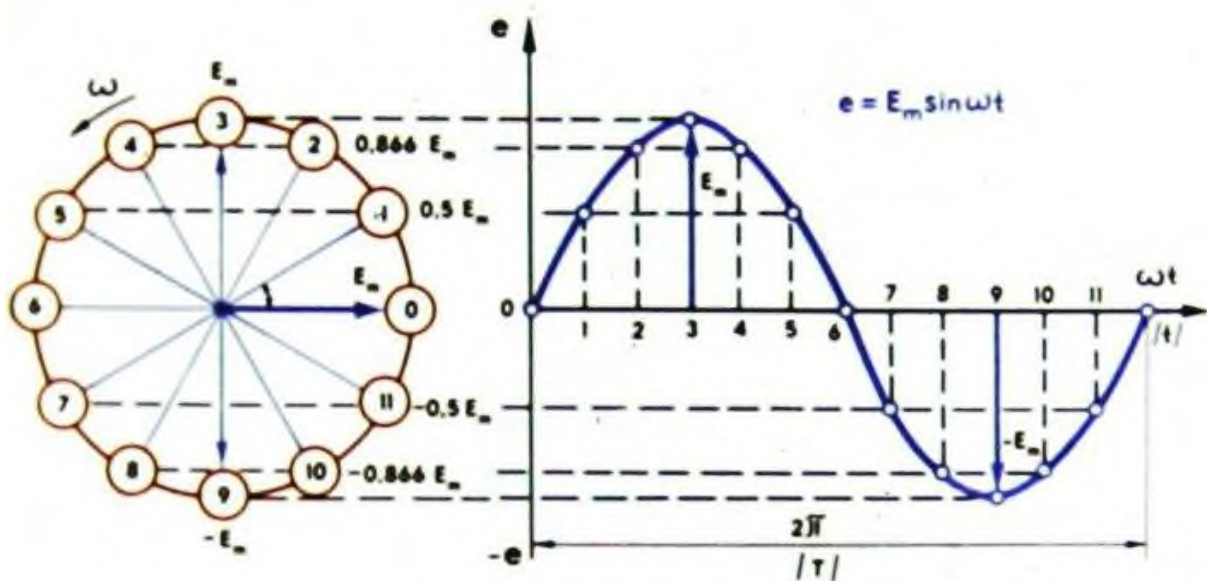


График мгновенных ЭДС.

Синусоидальный ток получают с помощью генератора переменного тока. У генератора переменного тока с одному обороту якоря ($\alpha = 2\pi$) соответствует один цикл изменения ЭДС .или один оборот якоря продолжается в течении одного периода T .

$$e = E_m \sin \alpha \quad e = E_m \sin \omega t$$

Для передачи и распределения электрической энергии преимущественно используется переменный ток благодаря простоте трансформации его напряжения почти без потерь мощности.

Основные параметры переменного тока.

Периодом T переменного тока называют наименьший промежуток времени (выраженный в сек), через который изменения силы тока (и напряжения) повторяются.

Частота f — число периодов в 1 сек:

$$f = 1/T.$$

Единица измерения Герц (Гц). $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$. В России и большинстве странах мира принята стандартная частота $f = 50 \text{ Гц}$, в США — 60 Гц .

Значение переменного тока, напряжения и др. в любой момент времени t называется **мгновенным значением**. Наибольшие из мгновенных значений называются **максимальными** или амплитудными.

Величина

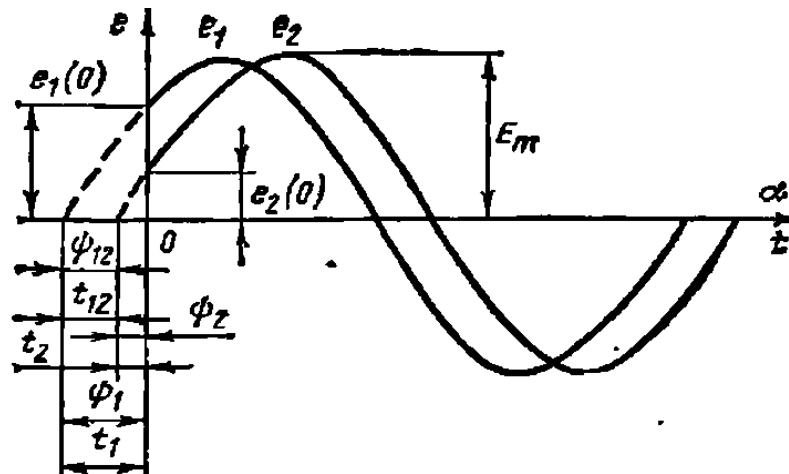
$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$$

называется **угловой частотой**. Единица измерения Рад/сек (Рад/с).

Синусоидальный ток можно представить в виде

$$i = I_m \sin (2\pi t/T) = I_m \sin 2\pi f t$$

На рисунке изображены графики двух ЭДС, вырабатываемых генератором.



Электрические углы φ_1 , φ_2 определяющие значение ЭДС в начальный момент времени, называются начальными фазовыми углами или начальными фазами.

$$e_1 = E_{\max} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$e_2 = E_{\max} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Разность начальных фаз называется углом сдвига фаз

$$\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Среднее значение параметра (например напряжения) синусоидального тока за пол периода (за период среднее значение равно 0)

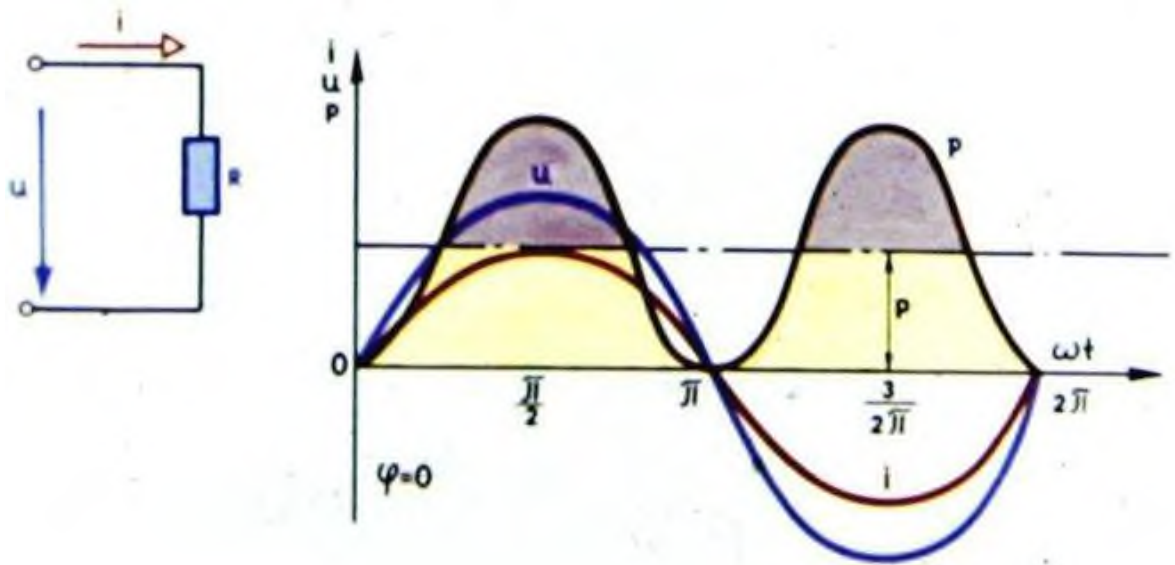
$$U_{\text{ср}} = 2U_{\text{макс}}/\pi = 0,637U_{\text{макс}}.$$

Действующее значение переменного тока равно значению такого эквивалентного постоянного тока, который, проходя по цепи с тем же сопротивлением, что и переменный, выделяет за период то же количество тепла.

$$U = U_{\text{макс}}/\sqrt{2} \approx 0,707 U_{\text{макс}}$$

↑

Цепь с резистивным элементом.



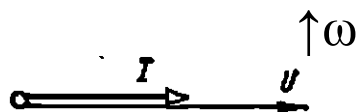
Мгновенные значения $i = I_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$ $u = U_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$

Действующие значения $U = U_{\text{макс}} / \sqrt{2}$ $I = I_{\text{макс}} / \sqrt{2}$

Активная мощность (средняя за период) $P = UI = I^2 R$ (Вт)

Активное сопротивление $R = P / I^2$

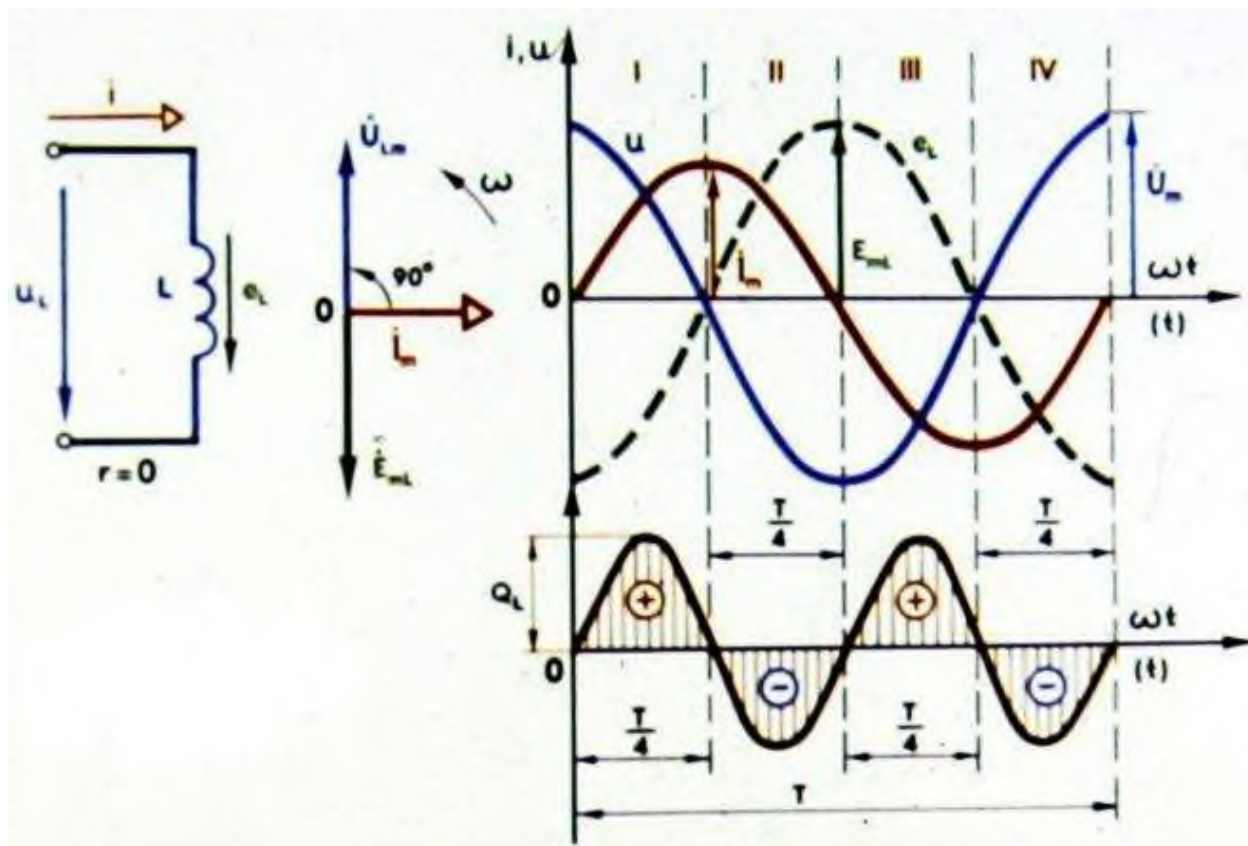
В цепи, содержащей только сопротивление, ток совпадает по фазе с напряжением.



Закон Ома для действующих значений в этой цепи будет иметь такую же форму, как для цепи постоянного тока

$$I = U / r.$$

Цепь с индуктивностью.



Мгновенные значения $i = I_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$ $u = U_{\text{макс}} \cdot \cos \omega t$

Индуктивное сопротивление $X_L = \omega \cdot L$

Максимальное значение мгновенной мощности в такой цепи называется реактивная мощность $Q_L = UI = I^2 \cdot \omega \cdot L$ (Вар)

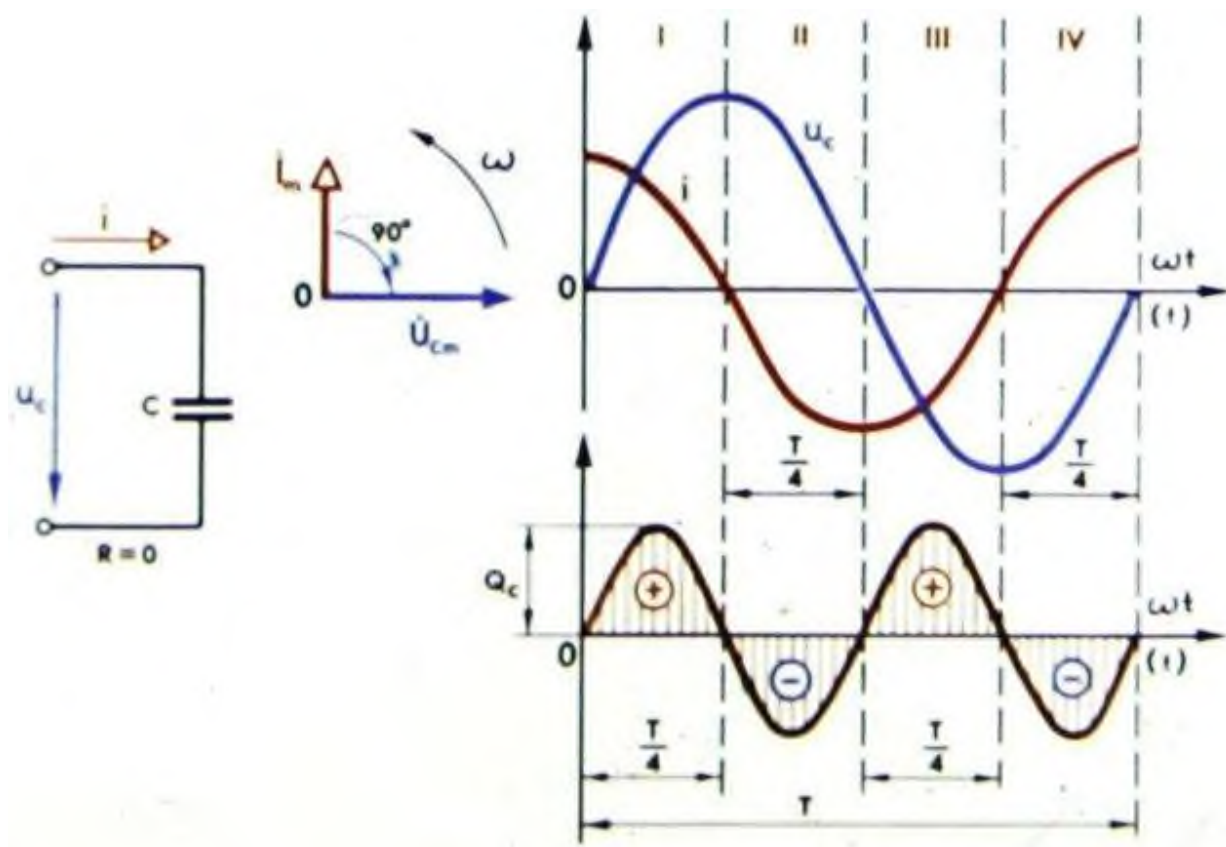
Единицы реактивной мощности такие же, как у активной, но для ясности, о какой мощности идёт речь называют **вольт – ампер реактивный (вар)**.

ЭДС самоиндукции противодействует изменениям тока, и в цепи, содержащей только индуктивность, **ток отстаёт по фазе от напряжения на четверть периода, то есть $\varphi = \pi/2$.**

Закон Ома для такой цепи имеет вид:

$$I = U/X_L = U/\omega L.$$

Цепь с ёмкостью.



Мгновенные значения $u = U_{\max} \cdot \sin \omega t$ $i = I_{\max} \cdot \sin (\omega t + \pi/2)$

Индуктивное сопротивление $X_c = 1/\omega C$

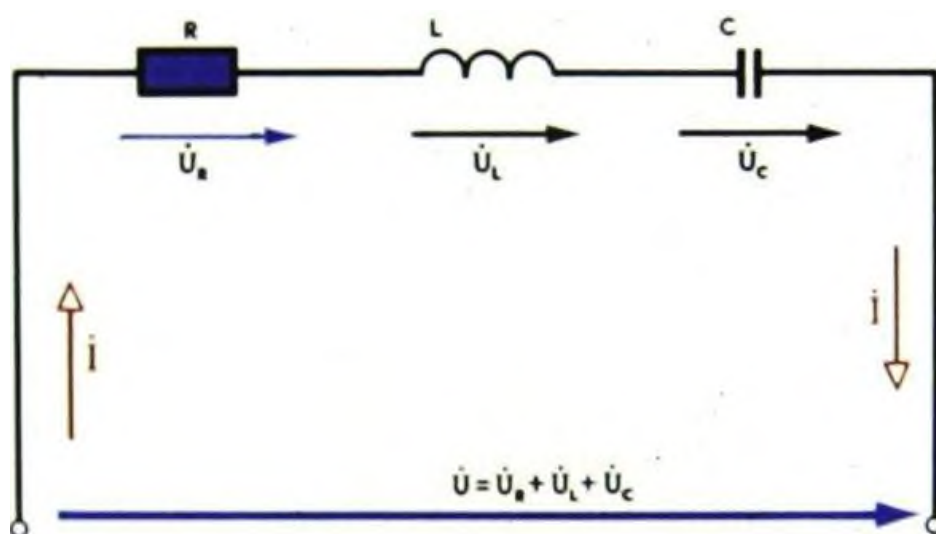
Реактивная мощность $Q_C = UI = \omega C U^2$ (Вар)

Синусоидальный переменный ток, проходящий через ёмкость, опережает по фазе напряжение на четверть периода, то есть $\varphi = -\pi/2$

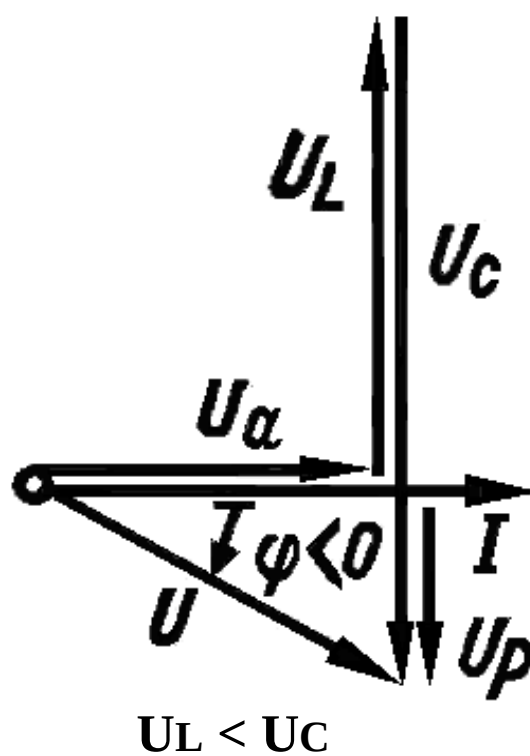
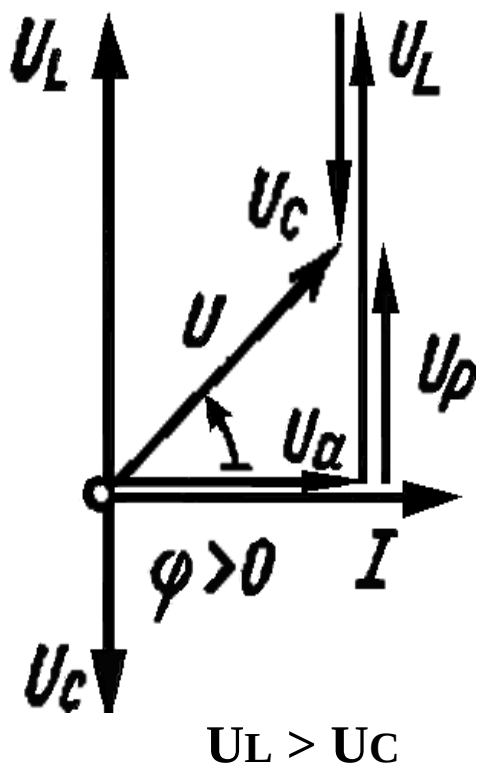
Закон Ома для такой цепи имеет вид

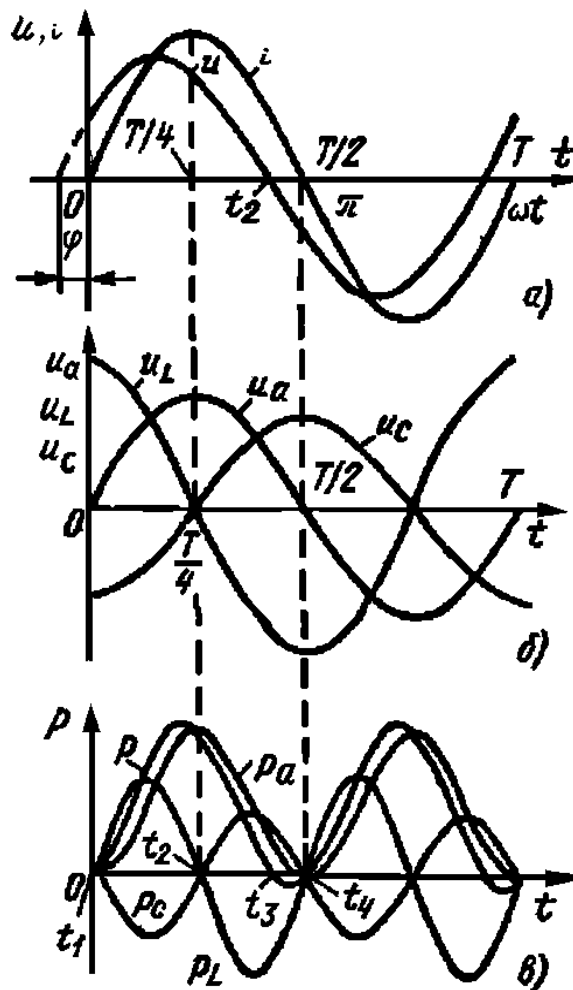
$$I = U\omega C = U/X_c$$

4.2. Цепь переменного тока с последовательным соединением элементов.



Треугольники напряжений при последовательном соединении R , L и C .





Ток, напряжение (а, б) и мощность (в) в цепи с сопротивлением, индуктивностью и ёмкостью.

Если $i = I_{\text{макс}} \sin \omega t$, то
 на сопротивлении $u_A = U_{A \text{ макс}} \sin \omega t$
 на ёмкости $u_C = U_{C \text{ макс}} \sin (\omega t - \pi/2)$
 на индуктивности $u_L = U_{L \text{ макс}} \sin (\omega t + \pi/2)$

Амплитуды этих значений

$$\begin{aligned} U_{A \text{ макс}} &= R I_{\text{макс}} \\ U_{L \text{ макс}} &= \omega L I_{\text{макс}} = X_L I_{\text{макс}} \\ U_{C \text{ макс}} &= (1/\omega C) I_{\text{макс}} = X_C I_{\text{макс}} \end{aligned}$$

Действующие значения

$$\begin{aligned} U_A &= R I \\ U_L &= \omega L I = X_L I \\ U_C &= (1/\omega C) I = X_C I \end{aligned}$$

U_A совпадает по фазе с током, U_L опережает по фазе ток на $1/4$ периода, U_C отстает по фазе от тока на $1/4$ периода.

Мгновенное значение напряжения на выводах цепи равно сумме составляющих

$$u = u_A + u_L + u_C = U_{A \text{ макс}} \sin \omega t + U_{L \text{ макс}} \sin (\omega t + \pi/2) + U_{C \text{ макс}} \sin (\omega t - \pi/2)$$

Реактивная составляющая напряжения.

$$U_P = U_L - U_C$$

Реактивная составляющая опережает по фазе активную на угол $\pi/2$ при U_L больше U_C и отстает на такой же угол при U_L меньше U_C .

Действующее значение напряжения

$$U = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Реактивное сопротивление цепи

$$X = X_L - X_C$$

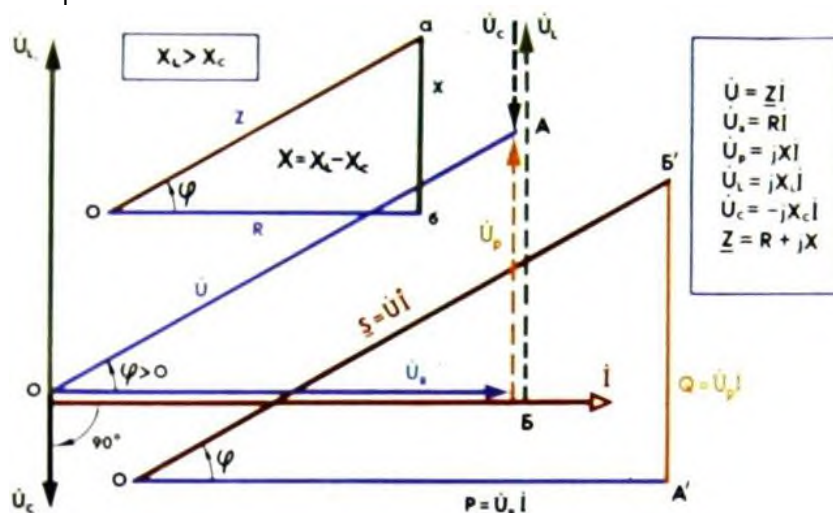
Полное сопротивление цепи (R – активное сопротивление цепи)

$$Z = U/I = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током равен углу между сторонами Z и R треугольника сопротивлений.

$$\operatorname{tg} \varphi = U_P/U_A = (X_L - X_C)/R = (\omega L - 1/\omega C)/R = X/R$$

$$\sin \varphi = U_P/U = X/Z$$



Треугольники напряжений сопротивлений и мощностей.

$$\varphi = \arctg ((\omega L - 1/\omega C)/R) = \arcsin (X/Z)$$

Т. о., если для такой цепи $i = I_{\text{макс}} \sin \omega t$, то $u = U_{\text{макс}} \sin (\omega t + \varphi)$.

Мгновенная мощность RLC цепи

$$p = p_A + p_L + p_C = u_A i + u_L i + u_C i$$

Средняя или активная мощность цепи всегда положительная

$$P = UI \cos \varphi = U_A I$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = U_P I = (U_L - U_C) I$$

Реактивная мощность может быть положительной (индуктивный режим: $U_L > U_C$; $X_L > X_C$; $\varphi > 0$) или отрицательной (емкостной режим: $U_L < U_C$; $X_L < X_C$; $\varphi < 0$)

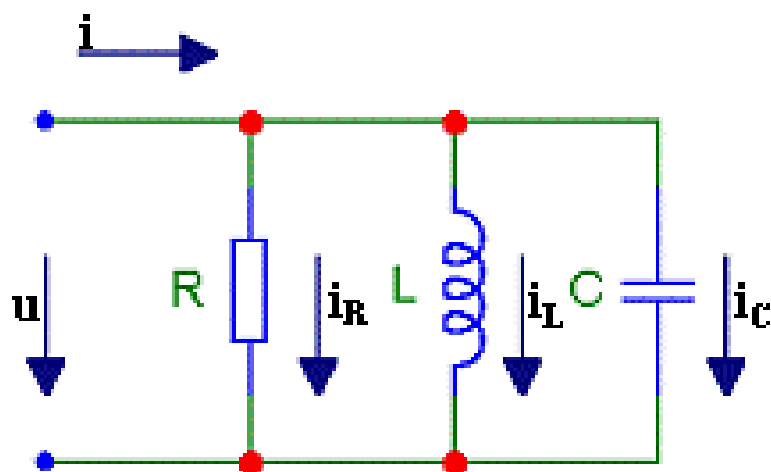
Полная мощность цепи

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

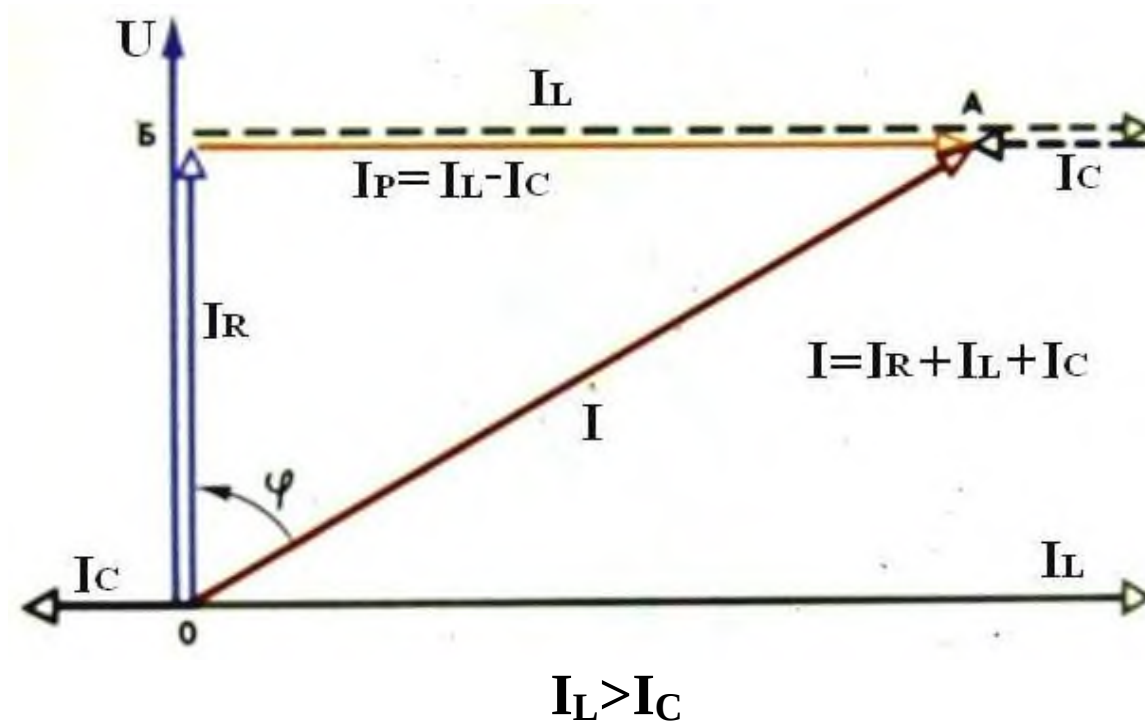
Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P/S$$

4.3. Цепь переменного тока с параллельным соединением элементов.



Векторная диаграмма токов при параллельном соединении R, L и C.



Если $u = U_{\text{макс}} \sin \omega t$, то

на сопротивлении $i_A = I_{A \text{ макс}} \sin \omega t$
 на ёмкости $i_C = I_{C \text{ макс}} \sin (\omega t + \pi/2)$
 на индуктивности $i_L = I_{L \text{ макс}} \sin (\omega t - \pi/2)$

Амплитуды этих значений

$$I_{A \text{ макс}} = U_{\text{макс}} / R = U_{\text{макс}} \cdot g$$

$$I_{L \text{ макс}} = U_{\text{макс}} / \omega L = U_{\text{макс}} / X_L = U_{\text{макс}} \cdot b_L$$

$$I_{C \text{ макс}} = U_{\text{макс}} \cdot \omega C = U_{\text{макс}} / X_C = U_{\text{макс}} / b_C$$

g , b_L и b_C активная, индуктивная и ёмкостная проводимости

Действующие значения

$$I_A = U / R = U \cdot g$$

$$I_L = U / \omega L = U / X_L = U \cdot b_L$$

$$I_C = U \cdot \omega C = U / X_C = U \cdot b_C$$

I_A совпадает по фазе с напряжением, I_C опережает по фазе напряжение на $1/4$ периода, I_L отстает по фазе от напряжения на $1/4$ периода.

Мгновенное значение тока в неразветвлённой части цепи равно сумме составляющих

$$i = i_A + i_L + i_C = I_{A \text{ макс}} \sin \omega t + I_{L \text{ макс}} \sin (\omega t - \pi/2) + I_{C \text{ макс}} \sin (\omega t + \pi/2)$$

Реактивная составляющая напряжения.

$$I_P = I_L - I_C$$

Реактивная составляющая опережает по фазе активную на угол $\pi/2$ при I_C больше I_L и отстает на такой же угол при I_C меньше I_L .

Действующее значение тока

$$I = \sqrt{(U g)^2 + (U b_L - U b_C)^2} = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$$

Реактивная проводимость цепи

$$b = b_L - b_C$$

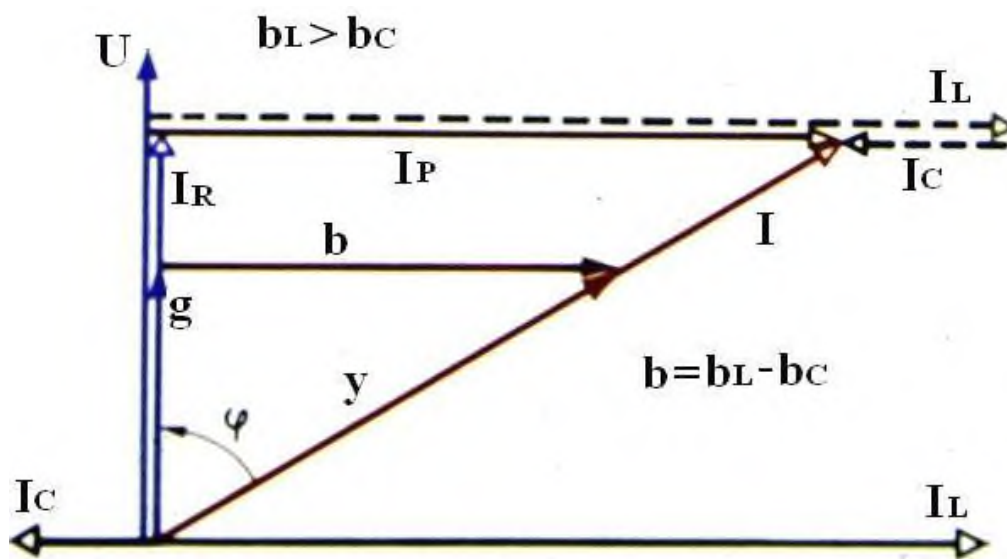
Полная проводимость цепи (g – активная проводимость цепи)

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{g^2 + b^2}$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током равен углу между сторонами y и g треугольника проводимостей.

$$\operatorname{tg} \varphi = I_P / I_A = (b_L - b_C) / g = (1/\omega L - \omega C) / g = b / g$$

$$\sin \varphi = I_P / I = b / y$$



Треугольники токов и проводимостей при параллельном соединении R, L и C.

$$\varphi = \arctg ((1/\omega L - \omega C) / g) = \arcsin (b / y)$$

Т. о., если для такой цепи $u = U_{\max} \sin \omega t$, то $i = I_{\max} \sin (\omega t - \varphi)$.

Мгновенная мощность RLC цепи

$$p = p_A + p_L + p_C = u i_A + u i_L + u i_C$$

Средняя или активная мощность цепи всегда положительная

$$P = UI \cos \varphi = UI_A$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = UI_P = U(I_L - I_C)$$

Реактивная мощность может быть положительной (индуктивный режим: $I_L > I_C$; $b_L > b_C$; $\varphi > 0$) или отрицательной (емкостной режим: $I_L < I_C$; $b_L < b_C$; $\varphi < 0$)

Полная мощность цепи

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

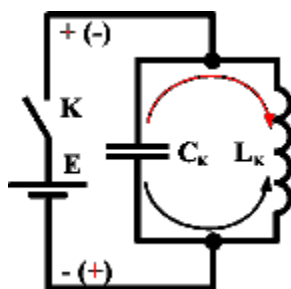
Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P/S$$

4.4. Резонанс в электрических цепях переменного однофазного тока.

Свободные и вынужденные колебания.

Если к цепи из параллельно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, кратковременно подключить источник постоянного тока, то конденсатор зарядится и затем начнет разряжаться через катушку. Катушка в этот момент будет накапливать энергию.



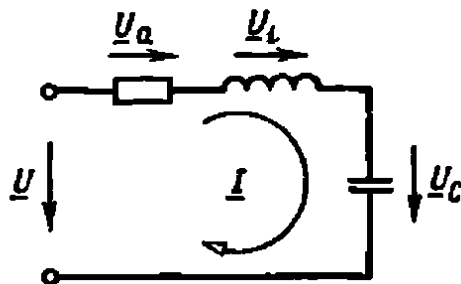
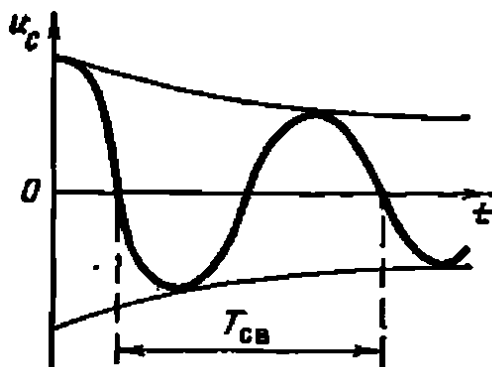
Затем процесс пойдет в обратном порядке, т.е. накопленная в катушке энергия будет заряжать конденсатор и т.д. В этой цепи будут происходить колебания.

Электрические цепи, в которых могут происходить периодические изменения режима (токов, зарядов, напряжений, мощности), называются колебательными.

Колебания происходят с частотой, называемой **частотой свободных колебаний**

$$F_{\text{св}} = 1 / T_{\text{св}}$$

В идеальном контуре колебания незатухающие, т.е. будут продолжаться бесконечно. Но катушка имеет сопротивление, а конденсатор не идеален. В контуре будут потери энергии, и колебания будут постепенно затухать. **Свободные колебания всегда затухающие.**



Колебания, которые возникают под действием внешних сил, называются вынужденными колебаниями. В электрических цепях к внешним силам относятся ЭДС (или токи) источников питания.

Резонанс.

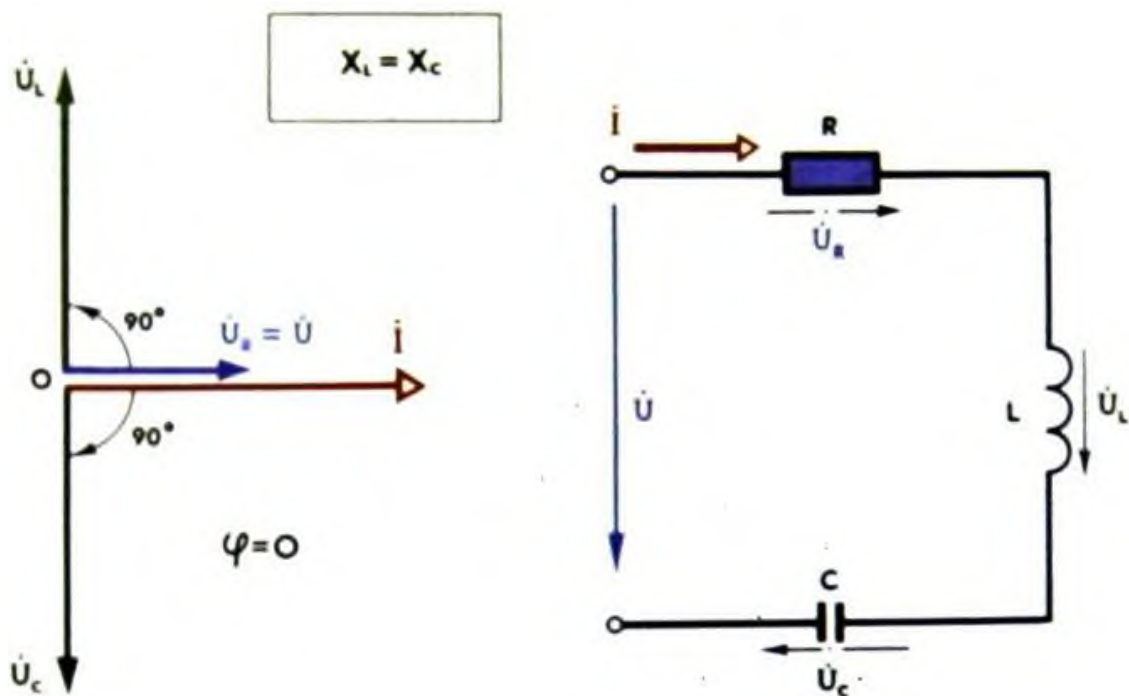
В теории колебаний резонансом называют процесс вынужденных колебаний с частотой, при которой их интенсивность максимальна.

Критерии интенсивности колебаний могут быть различны (например, амплитуда напряжения на конденсаторе).

Примем в качестве критерия режима резонанса совпадение по фазе напряжения и тока на выводах цепи. Это **фазовый резонанс. Ток совпадает по фазе с напряжением, если реактивная составляющая входного сопротивления или входной проводимости равна нулю.**

Резонанс напряжений.

Резонанс напряжений возникает в последовательной R, L, C цепи.



По критериям резонанса реактивная составляющая входного сопротивления равна 0.

$$X = X_L - X_C = \omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0, \text{ т. е.} \\ X_L = X_C \text{ или } \omega_0 L = 1/\omega_0 C$$

Поэтому, частота, с которой наступает резонанс (**угловая резонансная частота**)

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

Так, как частота $f = \omega / 2\pi$, то **резонансная частота**

$$f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$$

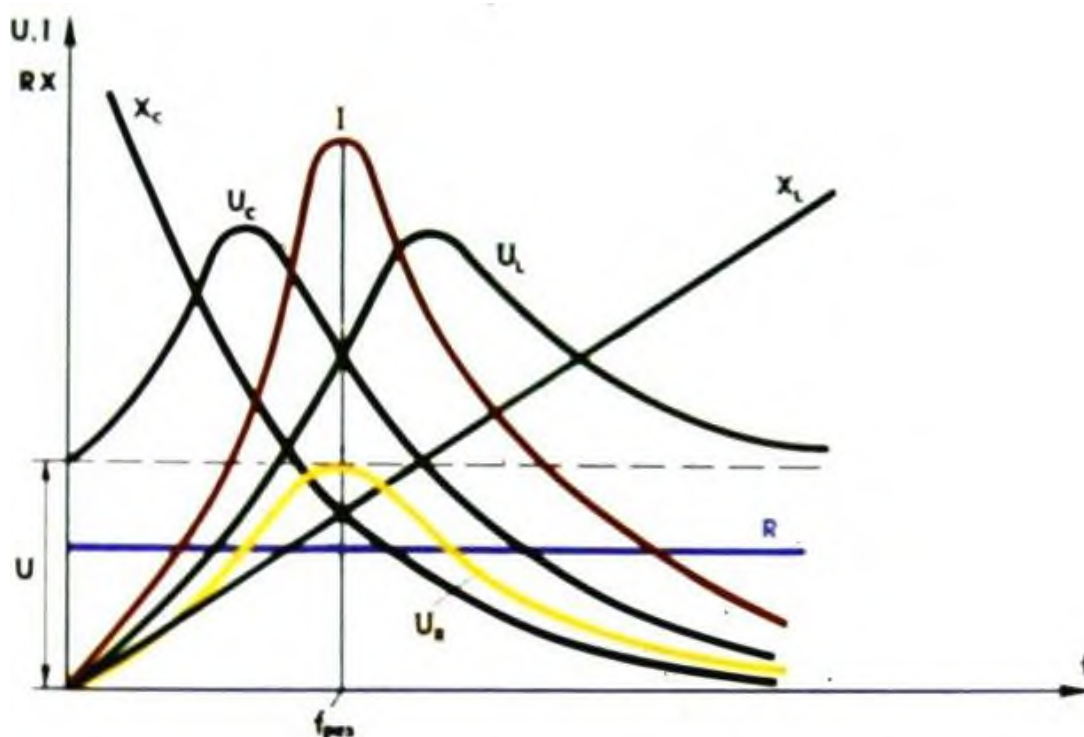
При резонансе сопротивление

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L / C} = \rho$$

и называется **характеристическим сопротивлением** последовательного контура.

Действующее значение напряжений на ёмкости и индуктивности получаются одинаковыми (поэтому назвали **резонанс напряжений**).

$$U_L = U_C$$



Добротность контура

$$q = U_L/U = U_C/U = \rho/R = \omega_0 L/R = 1/\omega_0 CR$$

Активная мощность

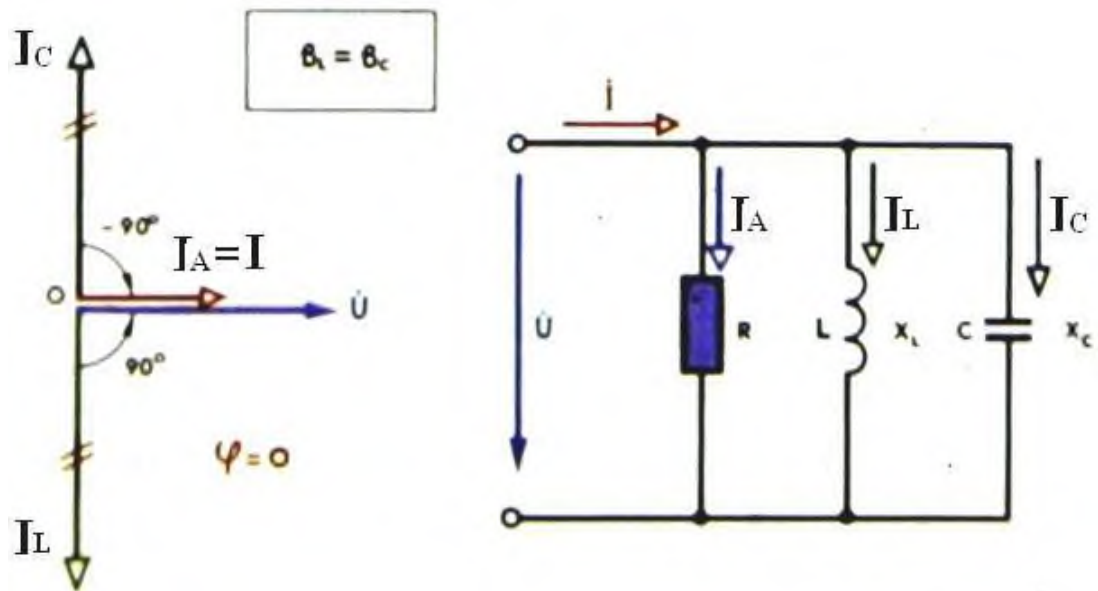
$$P = U_A I = R I^2$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = 0, \text{ так как } \varphi = 0$$

Резонанс токов.

Резонанс токов возникает в цепи, содержащей, параллельно включенные емкость и индуктивность.



По критериям резонанса реактивная составляющая входной проводимости равна 0.

$$b = b_L - b_C = 1/\omega_0 L - \omega_0 C = 0, \text{ т. е.} \\ b_L = b_C \text{ или } 1/\omega_0 L = \omega_0 C$$

Угловая резонансная частота

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

Резонансная частота

$$f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$$

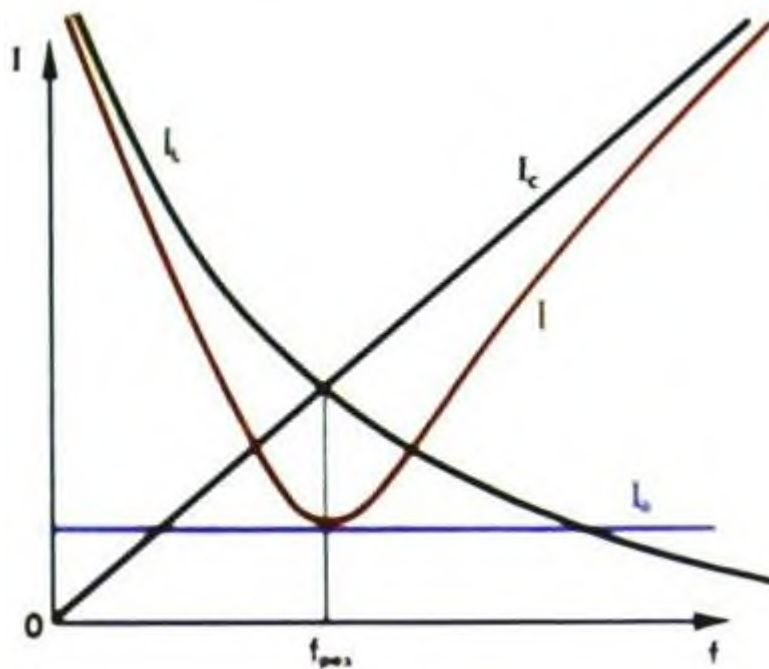
Проводимость

$$\omega_0 C = 1/\omega_0 L = \sqrt{C/L} = \beta$$

называется **характеристической проводимостью** параллельного контура.

Действующее значение токов через ёмкость и индуктивность получаются одинаковыми (поэтому назвали **резонанс токов**).

$$I_L = I_C$$



Активная мощность

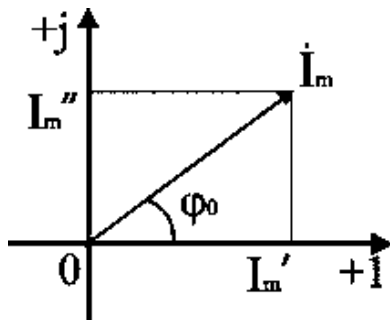
$$P = UI_A = U^2/R$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = 0, \text{ так как } \varphi = 0$$

4.5. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока.

Все параметры цепи представляются в комплексной форме.



$$\begin{aligned}\dot{I}_m &= \underline{I_m} = I_m' + jI_m'' = I_m \cdot e^{j\varphi} = I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi_0)} = \\ &= I_m \cdot e^{j\varphi_0} \cdot e^{j\omega t}.\end{aligned}$$

Поворотный множитель.

Комплексная амплитуда.

$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\varphi_0} \cdot e^{j\omega t}$ – комплексное мгновенное значение;

$\dot{I} = I \cdot e^{j\varphi_0}$ – комплексное действующее значение силы тока;

$\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi_0}$ – комплексное действующее значение напряжения.

Пример.

$$i(t) = 10 \sqrt{2} \sin \left(314 t + \frac{\pi}{4} \right) \Rightarrow \dot{I} = 10 e^{j\frac{\pi}{4}} (\text{A}).$$

Достоинство комплексного метода: при его применении в анализе цепей переменного тока можно применять все известные методы анализа постоянного тока.

Закон Ома в комплексной форме.

Под законом Ома в комплексной форме понимают:

$$\dot{I} = \dot{U} / Z$$

$$\begin{cases} \dot{I} = I e^{j\varphi}, \\ \dot{U} = U e^{j\varphi_0} \end{cases} \Rightarrow Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\varphi_0 - \varphi)} = z e^{\pm j\varphi} = z \cos \varphi \pm jz \sin \varphi = r \pm jx.$$

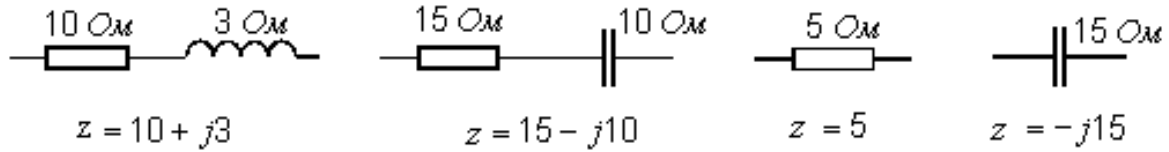
Комплексное сопротивление участка цепи представляет собой комплексное число, вещественная часть которого соответствует величине активного сопротивления, а коэффициент при мнимой части – реактивному сопротивлению.

По виду записи комплексного сопротивления можно судить о характере участка цепи:

$R + jX$ — активно-индуктивное сопротивление;

$R - jX$ — активно-емкостное.

Примеры.



Первый закон Кирхгофа в комплексной форме.

Алгебраическая сумма комплексных действующих значений токов в узле равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0.$$

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме.

В замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма комплексных действующих значений ЭДС равна алгебраической сумме комплексных падений напряжений в нём.

$$\sum_{k=1}^n \dot{E}_k = \sum_{k=1}^n \dot{I}_k Z_k$$

Полная мощность в комплексной форме.

При использовании символического метода можно пользоваться понятиями мощностей. Но в комплексной форме можно записать только полную мощность:

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \ddot{I} = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_U + \varphi_I)} = U \cdot I \cdot e^{\pm j\varphi} = S \cdot e^{\pm j\varphi},$$

где $\ddot{I}$ — комплексно-сопряженный ток

$$S \cos \varphi \pm j S \sin \varphi = P \pm j Q$$

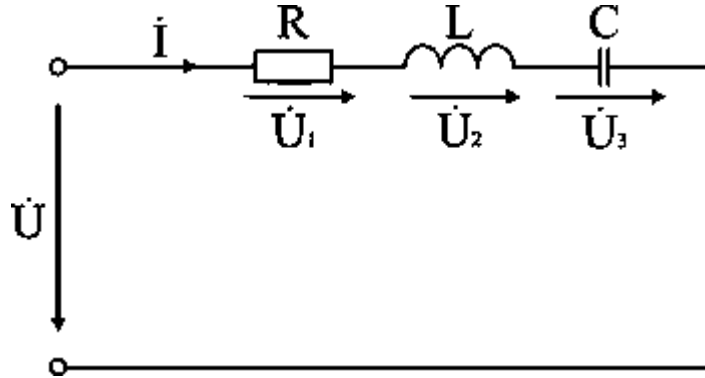
Полная мощность в комплексной форме представляет собой комплексное число, вещественная часть которого соответствует активной мощности рассматриваемого участка, а коэффициент при мнимой части — реактивной мощности участка. Значение знака перед

мнимой частью: “+” означает, что напряжение опережает ток, нагрузка — активно-индуктивная; “−” означает, что нагрузка - активно-емкостная.

4.6. Примеры решения задач к разделу 4.

Задача 1. Расчет электрических параметров цепи.

Электрическая цепь, показанная на рисунке, питается от источника синусоидального тока с частотой 200 Гц и напряжением 120 В. Дано: $R = 4 \text{ Ом}$, $L = 6,37 \text{ мГн}$, $C = 159 \text{ мкФ}$.



Вычислить ток в цепи, напряжения на всех участках, активную, реактивную, и полную мощности. Построить векторную диаграмму, треугольники сопротивлений и мощностей.

Решение.

1. Вычисление сопротивлений участков и всей цепи

Индуктивное реактивное сопротивление

$$X_L = 2\pi f L = 2 \times 3,14 \times 200 \times 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Емкостное реактивное сопротивление

$$X_C = 1 / (2\pi f C) = 1 / (2 \times 3,14 \times 200 \times 159 \cdot 10^{-6}) \text{ Ом.}$$

Реактивное и полное сопротивления всей цепи:

$$X = X_L - X_C = 3 \text{ Ом;}$$

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

2. Вычисление тока и напряжений на участках цепи

Ток в цепи

$$I = U / Z = 120 / 5 \text{ А.}$$

Напряжения на участках:

$$U_1 = R I = 96 \text{ В; } U_2 = X_L I = 192 \text{ В; } U_3 = X_C I = 120 \text{ В.}$$

3. Вычисление мощностей

Активная мощность

$$P = R I^2 = U_1 I = 2304 \text{ Вт.}$$

Реактивные мощности:

$$Q_L = X_L I^2 = U_2 I = 4608 \text{ ВАр}; Q_C = X_C I^2 = U_3 I = 2880 \text{ ВАр.}$$

Полная мощность цепи

$$S = UI = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = 2880 \text{ ВА.}$$

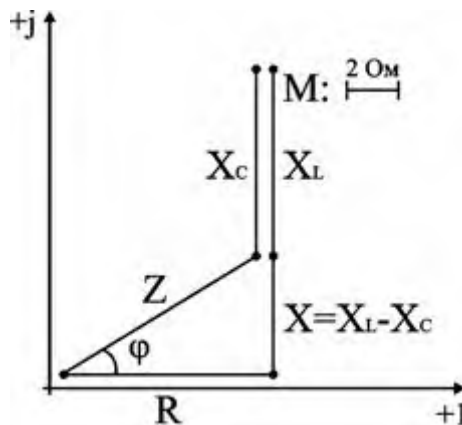
4. Расчет цепи методом комплексных чисел

Запишем в комплексном виде сопротивление каждого элемента и всей цепи

$$R = 4e^{j0^\circ} = 4 \text{ Ом}; X_L = 8e^{+j90^\circ} = j8 \text{ Ом}; X_C = 5e^{-j90^\circ} = -j5 \text{ Ом.}$$

$$Z = R + j(X_L - X_C) = 4 + j(8 - 5) \text{ Ом.}$$

На комплексной плоскости в масштабе: в 1 см – 2 Ом, построим треугольник сопротивлений.



Из треугольника определим величину полного сопротивления Z и угол фазового сдвига φ

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 5 \text{ Ом};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{3}{4} = 37^\circ$$

В показательной форме полное сопротивление всей цепи запишется в виде

$$Z = Ze^{+j\varphi} = 5e^{+j37^\circ} \text{ Ом.}$$

Примем начальную фазу приложенного к цепи напряжения за нуль и определим по закону Ома ток в данной цепи

$$\dot{I} = \dot{U} / Z = 120e^{+j0^\circ} / 5e^{+j37^\circ} \text{ A.}$$

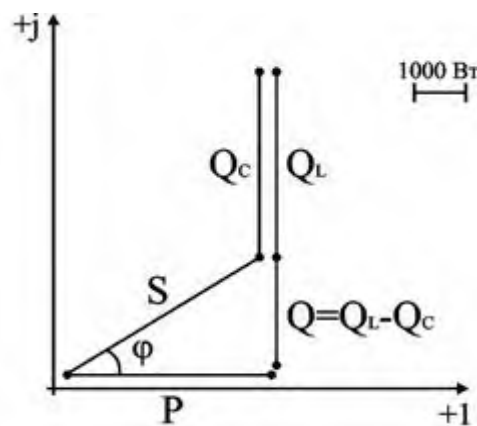
Следовательно, в данной цепи ток отстает по фазе от напряжения на угол φ . Зная величину тока I , определим мощности для отдельных элементов и всей цепи.

$$P = 2304 \text{ Вт}; Q_L = 4608 \text{ ВАр}; Q_C = 2880 \text{ ВАр}.$$

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

Треугольник мощностей в масштабе: в 1 см – 1000 Вт (ВАр); (ВА), на основе выражения для полной мощности

$$S^2 = P^2 + (Q_L - Q_C)^2.$$



Для построения векторных диаграмм по току и напряжениям примем начальную фазу тока равной нулю, т.к. ток I в данной схеме является одним и тем же для всех элементов в цепи.

$$\dot{I} = Ie^{+j0^\circ} / 24e^{+j0^\circ} \text{ A.}$$

Запишем выражения для напряжений в комплексной форме

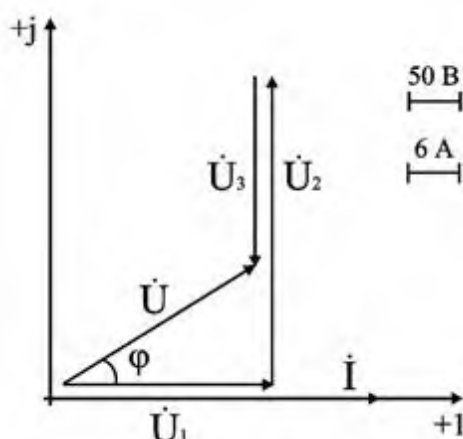
$$\dot{U}_1 = R \dot{I} = 96e^{+j0^\circ} \text{ В}; \dot{U}_2 = X_L \dot{I} = 192e^{+j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_3 = X_C \dot{I} = 120e^{-j90^\circ} \text{ В}; \dot{U} = Z \dot{I} = 120e^{+j37^\circ} \text{ В}.$$

Выберем масштабы для векторной диаграммы: в 1 см – 6 А; в 1 см – 50 В. Векторная диаграмма напряжений строится на основе второго закона Кирхгофа для данной цепи

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3.$$

Векторная диаграмма цепи показана на рисунке. При последовательном соединении



элементов построение диаграммы начинают с вектора тока $\dot{I}$, по отношению к которому ориентируются вектора напряжений на участках цепи: напряжение на активном сопротивлении $\dot{U}_1$ совпадает с ним по направлению, напряжение на индуктивности $\dot{U}_2$ опережает его на 90° , на емкости отстает на 90° . Полное напряжение $\dot{U}$ строится как их векторная сумма.

Дополнительные вопросы к задаче 1

1. Какой характер носит эквивалентное реактивное сопротивление цепи?

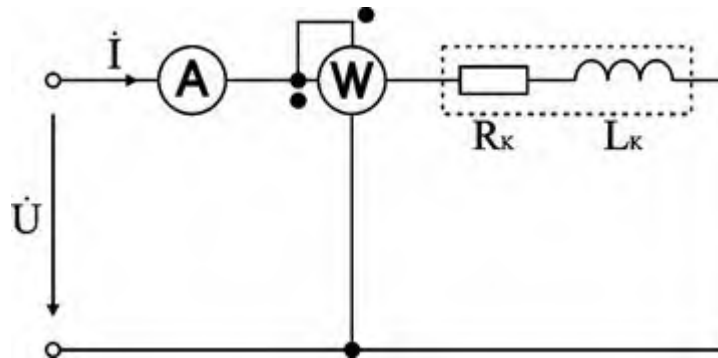
По условию задачи $X_L > X_C$, поэтому $X = X_L - X_C$ имеет индуктивный характер. Обратите внимание, что реактивные сопротивления отдельных участков цепи (X_L , X_C) могут быть больше ее полного сопротивления, так в данном случае $X_L > Z$.

2. Как изменяется режим работы цепи при изменении частоты питающего напряжения?

От частоты зависят реактивные сопротивления: X_L прямо пропорционально частоте f , X_C обратно пропорционально f . В рассматриваемой схеме $X_L > X_C$, поэтому при росте частоты X возрастает, ток уменьшается и возрастает угол φ его отставания от напряжения. При уменьшении частоты X уменьшается и при некотором ее значении $X = 0$, т.е. схема ведет себя как чисто активное сопротивление (режим резонанса напряжений, при котором $U_L = U_C$, $Z = R$ и ток наибольший). При дальнейшем уменьшении частоты $X_C > X_L$, Z возрастает, I уменьшается, схема ведет себя как активно-емкостное сопротивление.

Задача 2. Определение параметров потребителя по опытным данным.

Катушка индуктивности подключена к сети с напряжением $U = 100$ В. Ваттметр показывает значение $P_K = 600$ Вт, амперметр: $I = 10$ А. Определить параметры катушки R_K , L_K .



Решение.

1. Вычисление полного сопротивления катушки

$$Z_K = U / I = 100 / 10 = 10 \text{ Ом.}$$

2. Вычисление активного сопротивления катушки R_K

Ваттметр измеряет активную мощность, которая в данной схеме потребляется активным сопротивлением R_K .

$$R_K = P_K / I^2 = 600 / 100 = 6 \text{ Ом.}$$

3. Вычисление индуктивности катушки L_K

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{100 - 36} = 8 \text{ Ом;}$$

$$X_K = 2\pi f L_K; \quad L_K = X_K / (2\pi f) = 8 / (2\pi \times 50) = 0,025 \text{ Гн.}$$

Дополнительные вопросы к задаче 2

1. Как решить задачу другим способом?

Параметры катушки индуктивности можно определить, рассчитав полную мощность S_K и реактивную мощность катушки Q_K .

$$S_K = U I = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ ВА.}$$

$$Q_K = \sqrt{S_K^2 - P_K^2} = \sqrt{1000^2 - 600^2} = 800 \text{ ВАр}$$

$$R_K = P_K / I^2 = 6 \text{ Ом}; X_K = Q_K / I^2 = 8 \text{ Ом};$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = 10 \text{ Ом}.$$

2. Записать законы изменения тока и всех напряжений для данной цепи.

Определим угол фазового сдвига между током $i(t)$ и приложенным напряжением $u(t)$

$$\varphi = \arctg(X_K / R_K) = \arctg(8 / 6) = 53^\circ.$$

В цепи с активно-индуктивной нагрузкой напряжение опережает ток на угол $\varphi = 53^\circ$. Амплитуды тока и напряжения определим, зная действующие значения тока и напряжения

$$I_m = \sqrt{2}I = 14,1 \text{ А}; U_m = \sqrt{2}U = 141 \text{ В}.$$

Законы изменения тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ запишутся в следующем виде:

$$i(t) = 14,1 \sin \omega t; u(t) = 141 \sin(\omega t + 53^\circ).$$

Для записи напряжений $u_R(t)$ и $u_L(t)$ определим их величины

$$U_R = R I = 60 \text{ В};$$

$$U_{Rm} = \sqrt{2} \times 60 = 84,8 \text{ В};$$

$$U_L = X_L I = 80 \text{ В};$$

$$U_{Lm} = \sqrt{2} \times 80 = 113 \text{ В}.$$

На активном сопротивлении R_K ток $i(t)$ и напряжение $u_R(t)$ по фазе совпадают. При протекании тока через индуктивность L_K возникает фазовый сдвиг $\varphi = 90^\circ$ между током $i(t)$ и напряжением $u_L(t)$.

$$u_R(t) = 84,8 \sin \omega t; u_L(t) = 113 \sin(\omega t + 90^\circ).$$

4.7. Тесты для самоконтроля по разделу 4.

1. Чему равно максимальное значение переменного тока, если амперметр показывает 1 А?
А) 0,707А
Б) 1А
В) 1,41А
Г) 2А

2. Выберите формулу, по которой можно посчитать угловую частоту
А) $\omega = 2\pi / f$
Б) $\omega = 2\pi T$
В) $\omega = 2\pi f$
Г) $\omega = 2\pi U$

3. Время, за которое переменный ток совершает полный цикл своих колебаний, называется _____ переменного тока
А) частотой
Б) периодом
В) мгновенным значением
Г) угловой частотой.

4. Величина промышленной частоты переменного тока в России составляет _____ Гц
А) 10
Б) 200
В) 60
Г) 50

5. Значение переменного тока в любой момент времени называется
А) максимальным
Б) номинальным
В) мгновенным
Г) минимальным

6. Угол сдвига фаз это
А) разность потенциалов
Б) разность начальных фаз
В) разность начальных состояний
Г) разность токов

7. По формуле $U \approx 0,707 U_m$ определяют

- А) максимальное значение
- Б) среднее значение
- В) действующее значение
- Г) минимальное значение

8. По формуле $X_L = \omega L$ определяют

- А) активное сопротивление
- Б) емкостное сопротивление
- В) индуктивное сопротивление
- Г) магнитное сопротивление

9. По формуле $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ определяют

- А) полное сопротивление
- Б) активное сопротивление
- В) реактивное сопротивление
- Г) индуктивное сопротивление

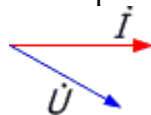
10. Реактивная мощность измеряется в

- А) ваттах
- Б) вольтах
- В) амперах
- Г) варах

11. Чему равна частота переменного тока, если период составляет 0,02с

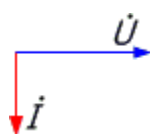
- А) 25 Гц
- Б) 200 Гц
- В) 100 Гц
- Г) 50 Гц

12. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?



- А)
- Б)
- В)
- Г)

13. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?



- А)
- Б)
- В)
- Г)

14. Указать ошибку в формулах при расчете цепи с последовательным соединением потребителей.

- А) $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
- Б) $Q = U I \cos \varphi$
- В) $I = S / U$
- Г) $P = I^2 R$

15. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?

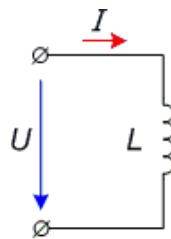


- А)
- Б)
- В)
- Г)

16. Какая из цепей имеет наибольшее полное сопротивление, если $R = X_L = X_C$?

- А)
- Б)
- В)
- Г)

17. Как изменится ток в цепи при увеличении частоты питающего напряжения?

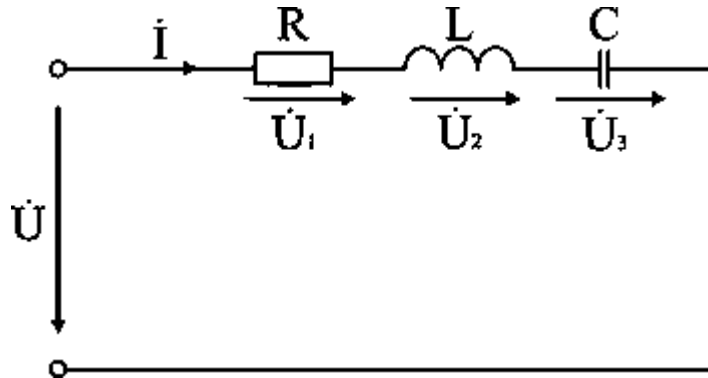


- А) Для ответа недостаточно данных
- Б) Увеличится
- В) Не изменится
- Г) Уменьшится

4.8. Задания для самоконтроля по разделу 4.

1. Электрическая цепь питается от источника синусоидального тока с частотой 200 Гц и напряжением 220 В. Дано: $R = 4 \text{ Ом}$, $L = 6,37 \text{ мГн}$, $C = 159 \text{ мкФ}$.

Вычислить ток в цепи, напряжения на всех участках, активную, реактивную, и полную мощности. Построить векторную диаграмму, треугольники сопротивлений и мощностей.



2. Четыре последовательно соединённых участка подключены к источнику с напряжением $U = 217 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$. Сопротивления участков $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $X_{L1} = 11 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $X_{C2} = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 5 \text{ Ом}$, $X_{L3} = 7 \text{ Ом}$, $R_4 = 6 \text{ Ом}$, $X_{C4} = 7 \text{ Ом}$.

Определить:

- 1) ток в цепи,
- 2) активную, реактивную и полную мощность в цепи
- 3) угол сдвига фаз между напряжением и током
- 4) напряжения на отдельных участках цепи
- 5) углы сдвига фаз между напряжениями на участках и током в цепи.

3. В цепи последовательно соединены R , L и C . $U = 220 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $R = 22 \text{ Ом}$, $L = 350 \text{ мГн}$, $C = 28,9 \text{ мкФ}$. Определить ток в цепи.

4. Определить эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей, если $Z_1 = 1 - j \cdot 0,5$ и $Z_2 = 1 + j \cdot 0,5$

5. Трехфазные цепи.

5.1. Получение трехфазного тока.

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем электрических цепей, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся по фазе одна от другой и создаваемые общим источником энергии.

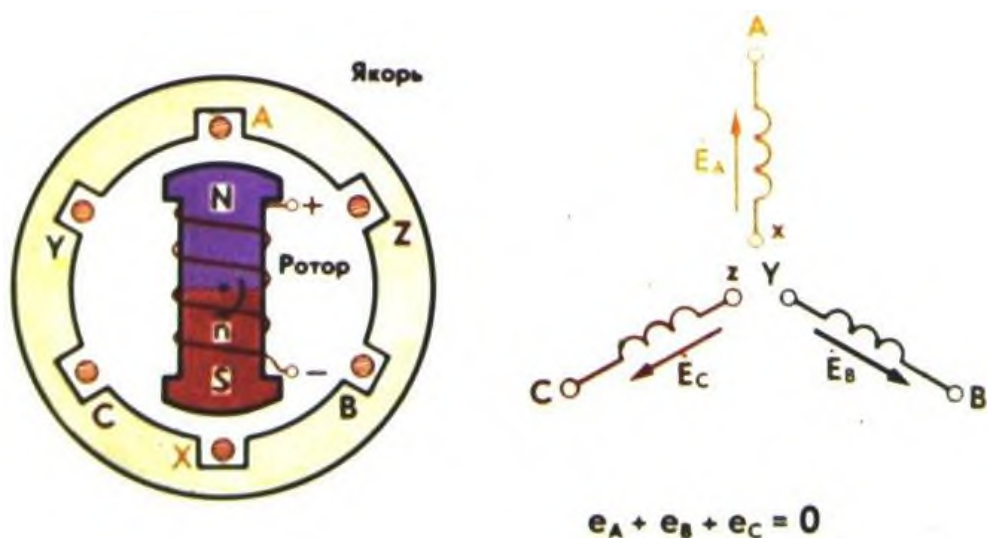
Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, принято называть **фазой**. Цепи в зависимости от количества фаз называют двухфазными, трехфазными, шестифазными и т.п.

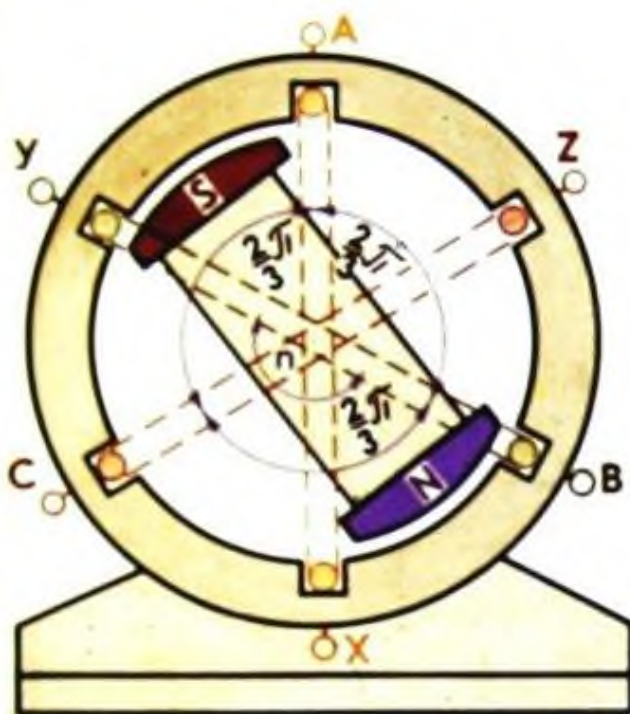
Трехфазные цепи – наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется их **преимуществами** по сравнению с однофазными и с другими многофазными цепями:

- экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;
- возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;
- возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС; линии передачи со всем необходимым оборудованием; приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).

Модель трехфазного генератора.





$$e = E_{mA} \sin \omega t$$

$$e = E_{mB} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right)$$

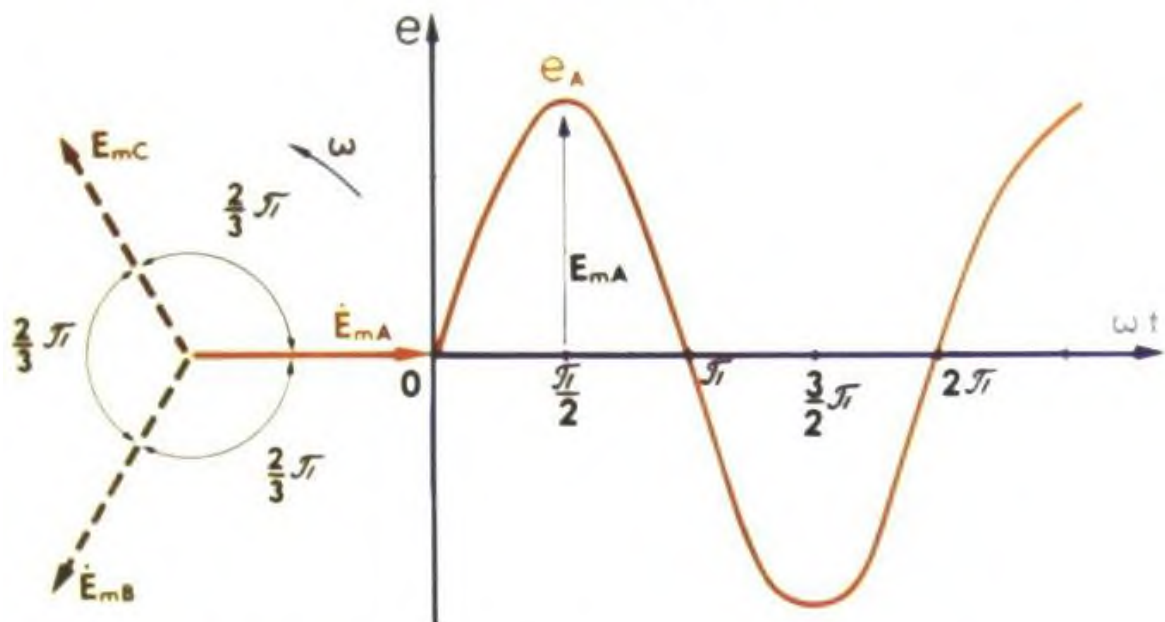
$$e = E_{mC} \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right)$$

На статоре генератора размещается обмотка, состоящая из трех частей или, как их принято называть, фаз. Обмотки фаз располагаются на статоре таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $2\pi/3$, т.е. на 120° . На рисунке каждая фаза обмотки статора условно показана состоящей из одного витка. Начала фаз обозначены буквами **A**, **B** и **C**, а концы – **X**, **Y**, **Z**. Ротор представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения, расположенной на роторе.

Принцип получения трёхфазного тока.

При вращении ротора турбиной с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся друг от друга по фазе на 120° вследствие их пространственного смещения.

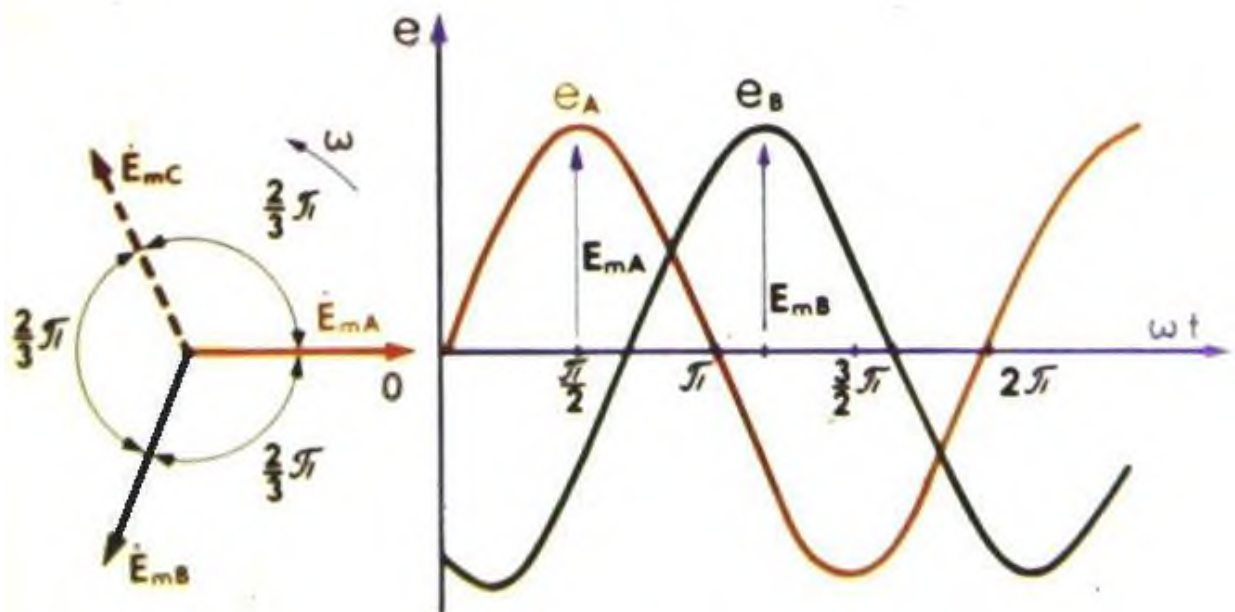
**Векторная диаграмма
трехфазной системы ЭДС
и график ЭДС фазы А**



Векторная
диаграмма

График
(временная диаграмма)

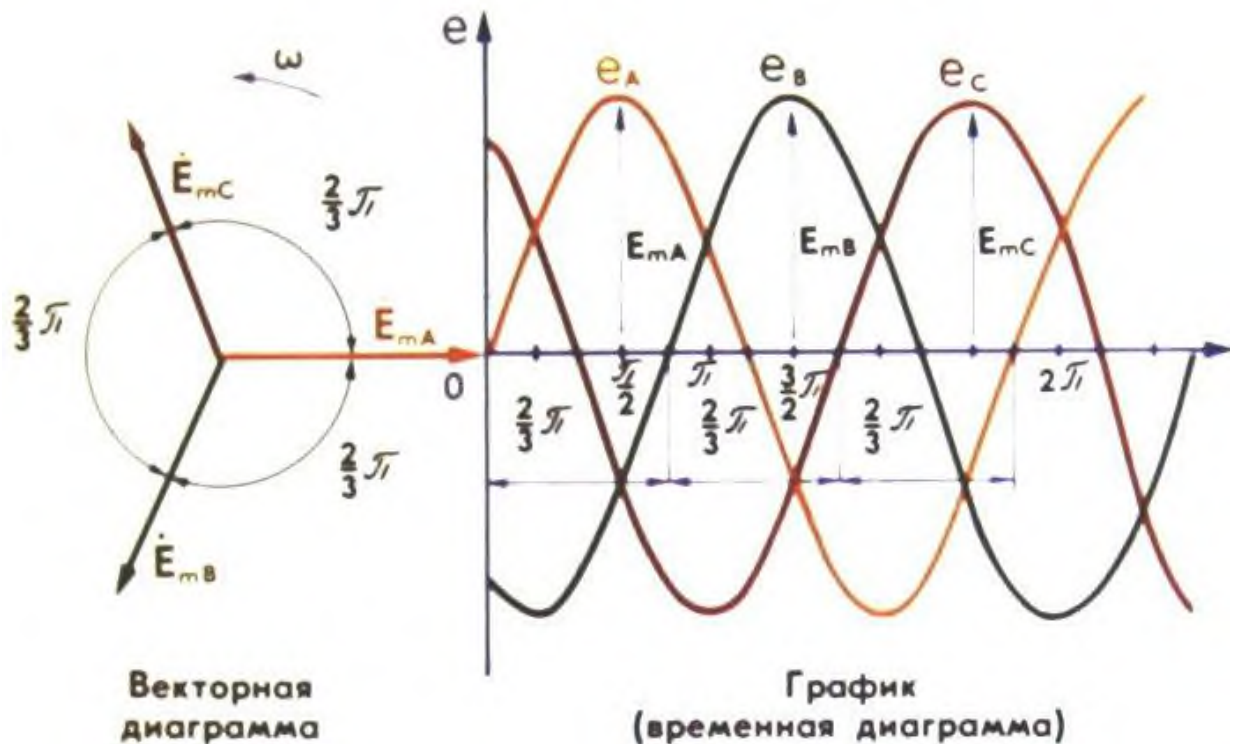
**Векторная диаграмма
трехфазной системы ЭДС
и график ЭДС фаз А и В**



Векторная
диаграмма

График
(временная диаграмма)

Векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС и график ЭДС фаз А, В и С



За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу. Обычно индуцированные в обмотках статора ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол 120° . Такая система ЭДС называется симметричной.

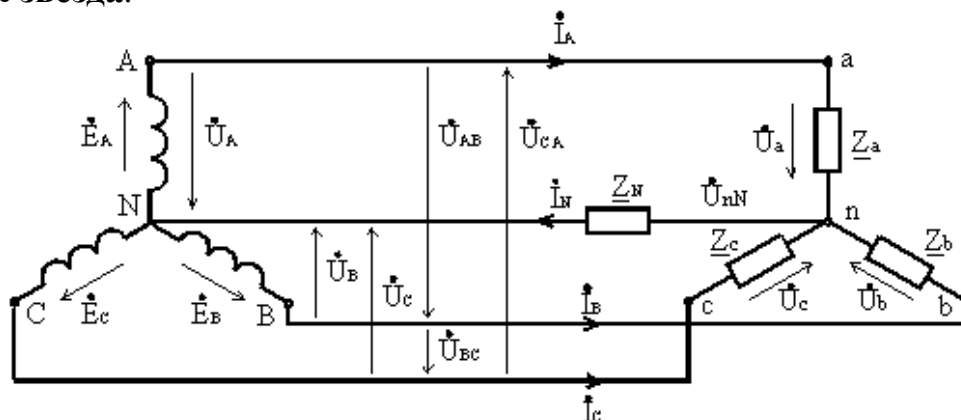
Если ЭДС одной фазы (например, фазы **A**) принять за исходную и считать её начальной фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС можно записать в виде

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t, \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned}$$

5.2. Расчет цепей трехфазного тока.

Соединение фаз генератора и приемника звездой.

При соединении фаз обмотки генератора звездой их концы X, Y и Z соединяют в одну общую точку N, называемую **нейтральной точкой (или нейтралью)**. Концы фаз приемников (Z_a , Z_b , Z_c) также соединяют в одну точку n. Такое соединение называется соединением **звезда**.



Провода A–a, B–b и C–c, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются **линейными**, провод N–n, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, – **нейтральным**.

Трехфазная цепь с нейтральным проводом будет **четырёхпроводной**, без нейтрального провода – **трехпроводной**.

Фазное напряжение U_{Φ} – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью (U_A , U_B , U_C у источника; U_a , U_b , U_c у приемника). Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ($U_A=U_a$, $U_B=U_b$, $U_C=U_c$). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

Линейное напряжение (U_L) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу.

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

Фазные (I_{Φ}) – это токи в фазах генератора и приемников.

Линейные (I_L) – токи в линейных проводах.

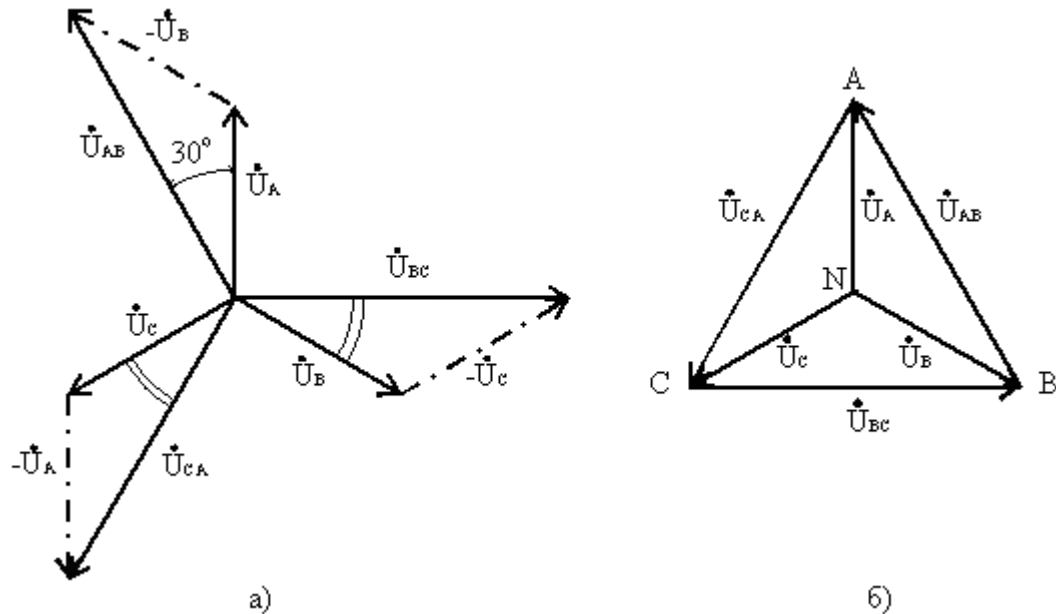
При соединении в звезду фазные и линейные токи равны

$$I_{\Phi}=I_L.$$

Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают I_N .

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n (N) имеем в комплексной форме

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$



В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений запишем уравнения по второму закону Кирхгофа.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Из векторной диаграммы видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° (общее обозначение U_L), и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений U_A , U_B , U_C , (U_Φ) на угол 30° .

Действующие значения линейных напряжений:

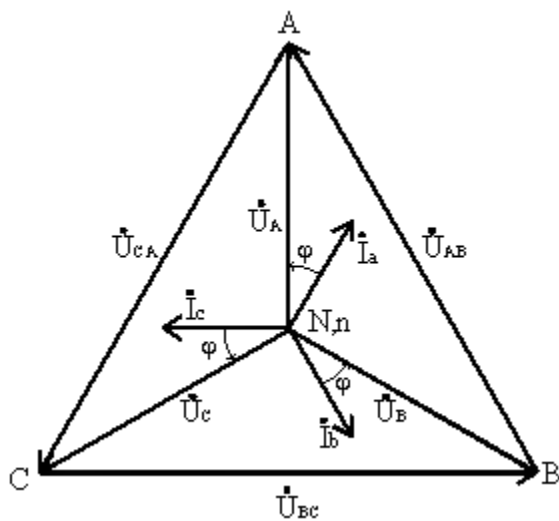
$$U_L = 2U_\Phi \cos 30^\circ \text{ или } U_L = \sqrt{3} U_\Phi$$

Симметричная нагрузка приемника при соединении звездой.

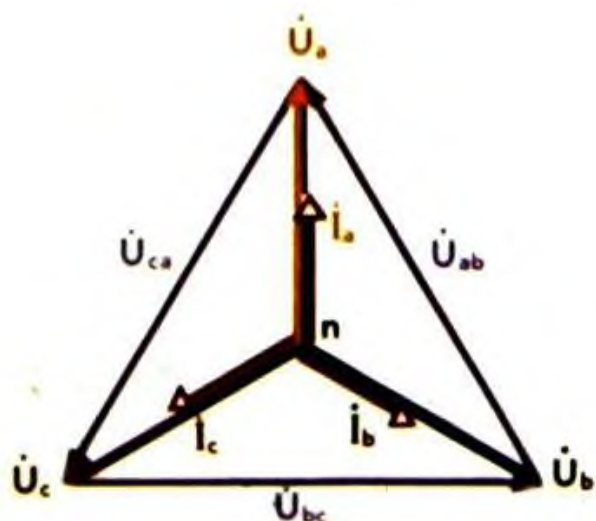
При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, т.е. когда $R_a = R_b = R_c = R_\Phi$ и $X_a = X_b = X_c = X_\Phi$, фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_a = I_b = I_c = I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi,$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \arctg (X_\Phi / R_\Phi).$$



$$\varphi \neq 0$$



$$\varphi = 0 \text{ (симметричная активная нагрузка)}$$

Геометрическая сумма трех векторов тока равна нулю: $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$. Следовательно, в случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе $I_N = 0$, поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

Несимметричная нагрузка приемника при соединении звездой.

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ и $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / Z_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / Z_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / Z_c.$$

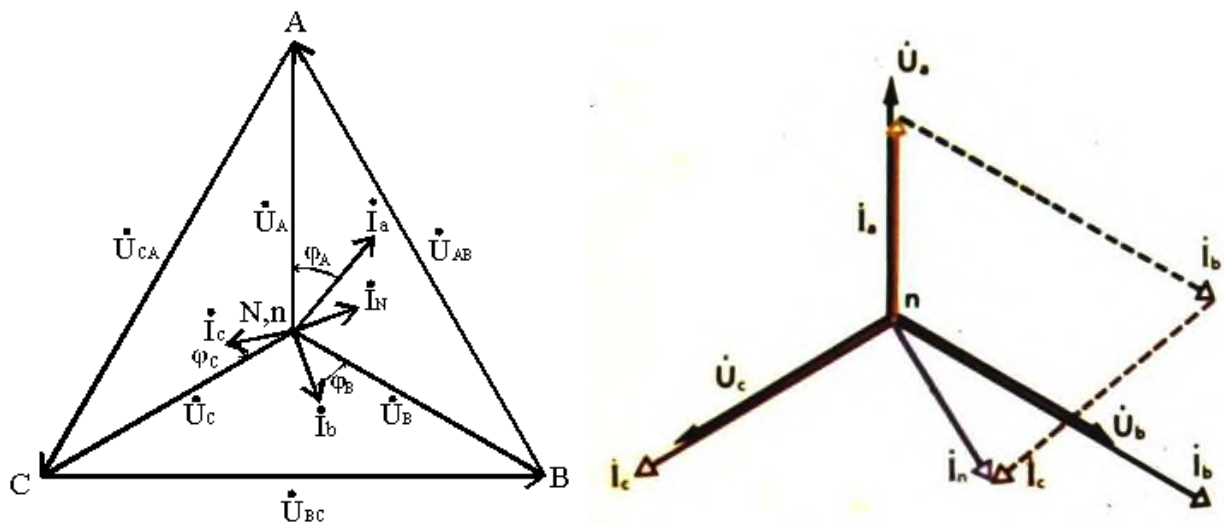
Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N$ равен геометрической сумме фазных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

Напряжения будут $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$, $U_\Phi = U_L / \sqrt{3}$, благодаря нейтральному проводу при $Z_N = 0$.

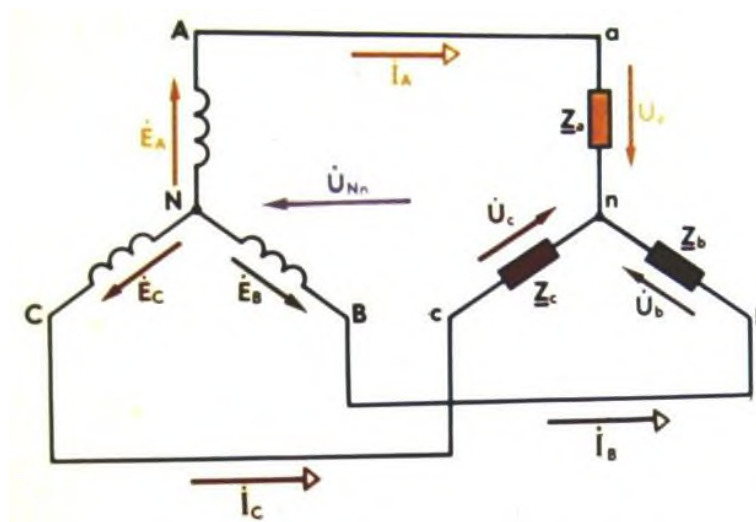
Следовательно, **нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.**

В четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки, например, электрические лампы накаливания. Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.



При активной нагрузке

Трехпроводная электрическая цепь (соединение звездой).



При симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$, напряжение между нейтральной точкой источника N и нейтральной точкой приемника n равно нулю, $U_{nN} = 0$.

Соотношение между фазными и линейными напряжениями приемника также равно $\sqrt{3}$, т.е. $U_\phi = U_L / \sqrt{3}$, а токи в фазах определяются по тем же формулам, что и для четырехпроводной цепи. В случае симметричного приемника достаточно определить ток только в одной из фаз. Сдвиг фаз между током и соответствующим напряжением $\varphi = \arctg(X/R)$.

При несимметричной нагрузке $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ между нейтральными точками приемника и источника электроэнергии возникает напряжение смещения нейтрали U_{nN} .

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

где: $\underline{Y}_a = 1 / \underline{Z}_a$; $\underline{Y}_b = 1 / \underline{Z}_b$; $\underline{Y}_c = 1 / \underline{Z}_c$ – комплексы проводимостей фаз нагрузки.

Напряжения на фазах приемника будут отличаться друг от друга. Из второго закона Кирхгофа следует, что

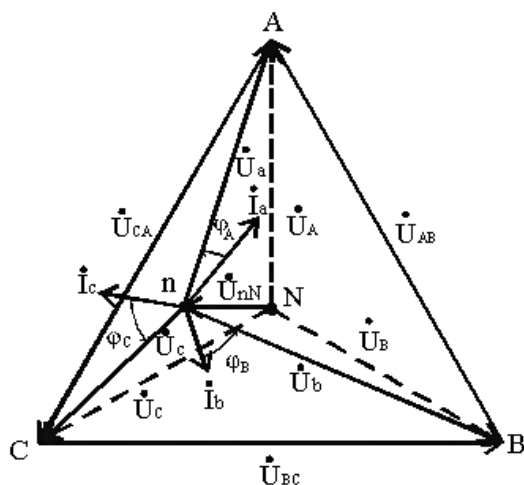
$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}.$$

Зная фазные напряжения приемника определим фазные токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a = \underline{Y}_a \dot{U}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b = \underline{Y}_b \dot{U}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c = \underline{Y}_c \dot{U}_c.$$

При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений напряжение смещений нейтрали U_{nN} может изменяться в широких пределах. При этом нейтральная точка приемника n на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приемника $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$ и $\dot{U}_c$ могут отличаться друг от друга весьма существенно.

Таким образом, **при симметричной нагрузке нейтральный провод можно удалить и это не повлияет на фазные напряжения приемника. При несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода фазные напряжения нагрузки уже не связаны жестко с фазными напряжениями генератора, так как на нагрузку воздействуют только линейные напряжения генератора. Несимметричная нагрузка в таких условиях вызывает несимметрию ее фазных напряжений $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$ и смещение ее нейтральной точки n из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).**



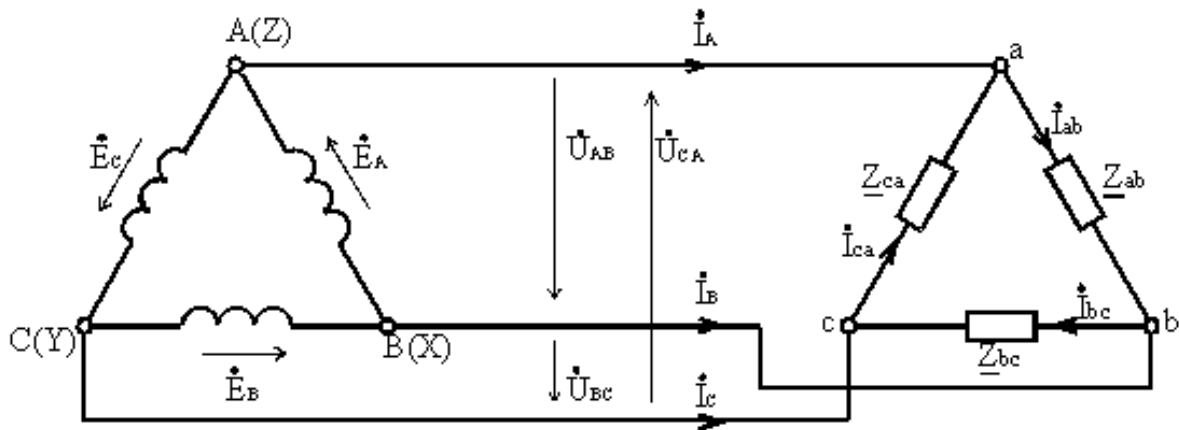
Нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;
- подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети.

В цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

Соединение фаз генератора и приемника треугольником.

При соединении источника питания треугольником конец X одной фазы соединяется с началом В второй фазы, конец Y второй фазы – с началом С третьей фазы, конец третьей фазы Z – с началом первой фазы А. Начала А, В и С фаз подключаются с помощью трех проводов к приемникам.



Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания, и поэтому недопустим.

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это напряжение между линейными проводами. Поэтому **при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.**

$$U_L = U_{\phi}.$$

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания: $U_{ab} = U_{AB}$, $U_{bc} = U_{BC}$, $U_{ca} = U_{CA}$. По фазам Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} приемника протекают фазные токи $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$ и $\dot{I}_{ca}$. Условное положительное направление фазных напряжений $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_{bc}$ и $\dot{U}_{ca}$ совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ принято от источников питания к приемнику.

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником **фазные токи не равны линейным.** Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи можно определить по фазным

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

Сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0,$$

Симметричная нагрузка.

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}e^{j\varphi}$$

$$\text{т.е. } Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z, \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi.$$

Так как линейные (они же фазные) напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

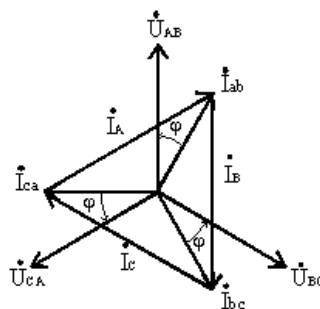
$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120° .

Линейные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc};$$

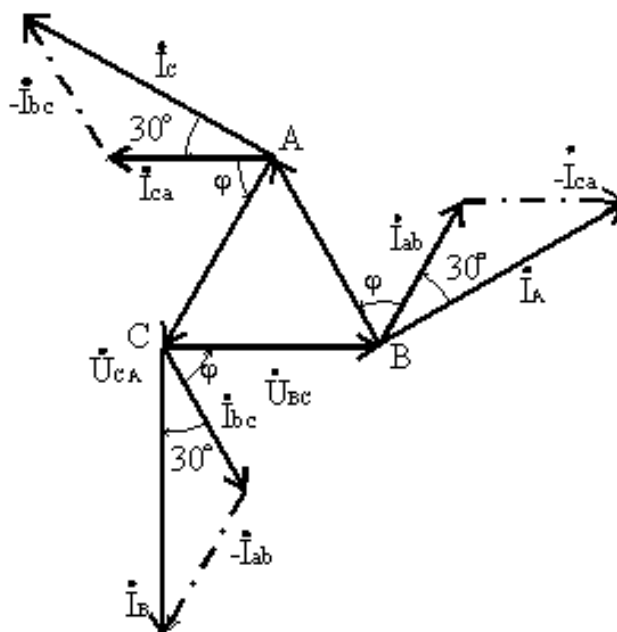
образуют также симметричную систему токов.



На векторной диаграмме фазные токи отстают от фазных напряжений на угол φ (полагаем, что фазы приемника являются индуктивными, т.е. $\varphi > 0^\circ$). Здесь принято, что напряжение U_{AB} имеет нулевую фазу. Из диаграммы следует, что любой линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток $\dot{I}_A$ отстает по фазе от фазного тока $\dot{I}_{ab}$ на угол 30° , на этот же угол отстает $\dot{I}_B$ от $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_C$ от $\dot{I}_{ca}$.

При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

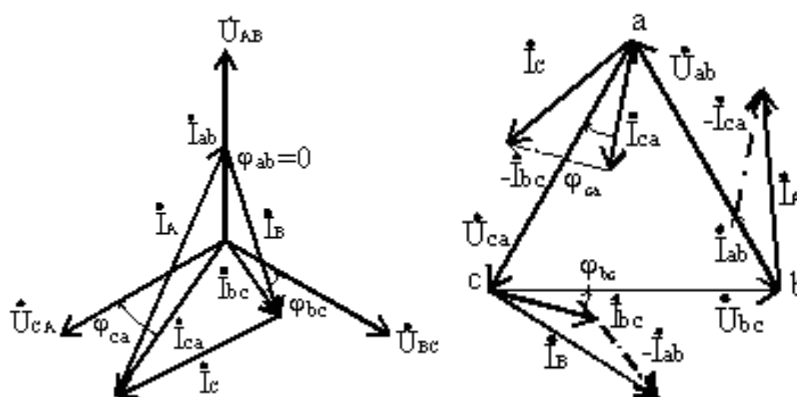
Фазное напряжение $U_\phi = U_L$. Фазный ток $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$, линейный ток $I_L = I_\phi$, угол сдвига по фазе $\varphi = \arctg(X_\phi / R_\phi)$.



Несимметричная нагрузка приемника.

В общем случае при несимметричной нагрузке $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Обычно она возникает при питании от трехфазной сети однофазных приемников.

Ниже приведены векторная и топографическая диаграммы для случая, когда в фазе ab имеется активная нагрузка, в фазе bc – активно-индуктивная, а в фазе ca – активно-емкостная.



Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что **при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным**, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой. Поэтому **схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки**.

При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$ и соответствующие им сдвиги фаз φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} . Затем определяют линейные токи в комплексной форме.

Мощность при соединении потребителей звездой.

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_a + P_b + P_c,$$

где

$$P_a = U_a I_a \cos \varphi_a; P_b = U_b I_b \cos \varphi_b; P_c = U_c I_c \cos \varphi_c;$$

U_a , U_b , U_c ; I_a , I_b , I_c – фазные напряжения и токи;

φ_a , φ_b , φ_c – углы сдвига фаз между напряжением и током.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c,$$

где

$$Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a; Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b; Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c.$$

Полная мощность отдельных фаз

$$S_a = U_a I_a; S_b = U_b I_b; S_c = U_c I_c.$$

Полная мощность трехфазного приемника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

.При симметричной системе напряжений ($U_a = U_b = U_c = U_\Phi$) и симметричной нагрузке ($I_a = I_b = I_c = I_\Phi$; $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$) фазные мощности равны $P_a = P_b = P_c = P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi$; $Q_a = Q_b = Q_c = Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi$.

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$P = 3 P_\Phi = 3 U_\Phi I_\Phi \cos \varphi.$$

Реактивная мощность

$$Q = 3 Q_\Phi = 3 U_\Phi I_\Phi \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3 S_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

В трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке достаточно измерить мощность одной фазы и утроить результат.

Мощность при соединении потребителей треугольником.

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca},$$

где

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}; P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc}; P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca};$$

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}; I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$ – фазные напряжения и токи;

$\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$ – углы сдвига фаз между напряжением и током.

Реактивная мощность равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca},$$

где

$$Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}; Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc}; Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}.$$

Полная мощность отдельных фаз

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab}; S_{bc} = U_{bc} I_{bc}; S_{ca} = U_{ca} I_{ca}.$$

Полная мощность трехфазного приемника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

При симметричной системе напряжений ($U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{\Phi}$) и симметричной нагрузке ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\Phi}$; $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$) фазные мощности равны $P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi$; $Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi$.

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$P = 3 P_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi.$$

Реактивная мощность

$$Q = 3 Q_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3 S_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины U_L и I_L .

При соединении фаз симметричного приемника звездой $U_{\Phi} = U_L / \sqrt{3}$, $I_{\Phi} = I_L$, при соединении треугольником $U_{\Phi} = U_L$, $I_{\Phi} = I_L / \sqrt{3}$. Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi.$$

где U_L и I_L – линейное напряжение и ток; $\cos \varphi$ – фазный.

Обычно индексы "л" и "ф" не указывают и формула принимает вид

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi.$$

Реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{3} U I.$$

Угол φ является углом сдвига фаз между фазным напряжением и током, и при неизменном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник его мощность увеличивается в три раза.

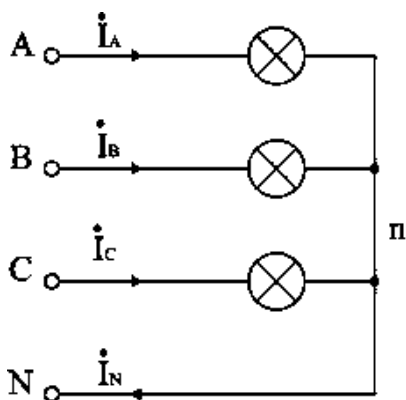
5.3. Примеры решения задач к разделу 5.

Задача 1. Расчет цепей при соединении источников и потребителей звездой.

Освещение здания питается от четырехпроводной трехфазной сети с линейным напряжением $U_L = 380$ В. Первый этаж питается от фазы "А" и потребляет мощность 1760 Вт, второй – от фазы "В" и потребляет мощность 2200 Вт, третий – от фазы "С", его мощность 2640 Вт. Составить электрическую схему цепи, рассчитать токи, потребляемые каждой фазой, и ток в нейтральном проводе, вычислить активную мощность всей нагрузки. Построить векторную диаграмму.

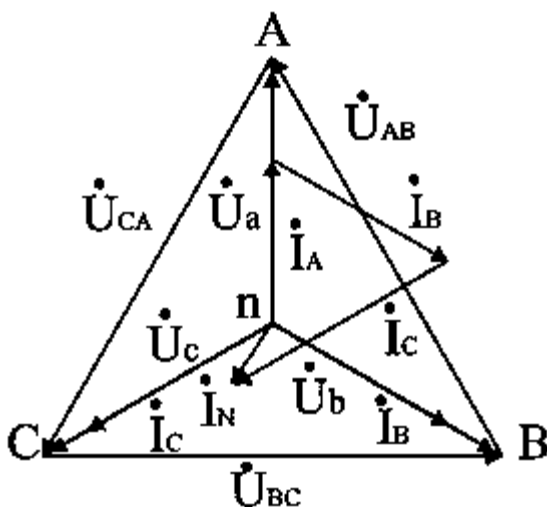
Решение.

Лампы освещения соединяются по схеме звезда с нейтральным проводом.



Расчет фазных напряжений и токов. При соединении звездой $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$, отсюда $U_\Phi = U_L / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220$ В. Осветительная нагрузка имеет коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$, поэтому $P_\Phi = U_\Phi \cdot I_\Phi$ и фазные токи будут равны:

$$I_A = P_A / U_\Phi = 1760 / 220 = 8 \text{ A}; I_B = P_B / U_\Phi = 2200 / 220 = 10 \text{ A}; \\ I_C = P_C / U_\Phi = 2640 / 220 = 12 \text{ A}.$$



Построение векторной диаграммы начинаем с равностороннего треугольника линейных напряжений $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$, и симметричной звезды фазных напряжений $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$. При

таком построении напряжение между любыми точками схемы можно найти как вектор, соединяющий соответствующие точки диаграммы, поэтому диаграмму называют топографической.

Токи фаз $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ связаны каждый со своим напряжением; в нашем случае по условию $\varphi = 0$, и токи совпадают по фазе с напряжениями. Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$. По построению (в масштабе) по величине $\dot{I}_N = 2,5 \text{ A}$.

Активная мощность цепи равна сумме мощностей ее фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = 1760 + 2200 + 2640 = 6600 \text{ Вт.}$$

Дополнительные вопросы к задаче 1.

1. Может ли ток в нейтральном проводе быть равным нулю?

Ток в нейтральном проводе равен нулю при симметричной нагрузке, в этом случае для нормальной работы цепи нейтральный провод не нужен, т.е. питание нагрузки возможно по трехпроводной схеме.

2. Как изменится режим работы цепи, если в одну из фаз вместо освещения включить двигатель?

Ток в этой фазе будет определяться включенной в нее нагрузкой, токи во остальных фазах не изменятся, изменится ток в нейтральном проводе (как по величине так и по фазе).

3. Какие токи изменятся, если в одной из фаз произойдет обрыв?

Токи в оставшихся фазах не изменятся, т.к. при наличии нейтрального провода напряжения на фазах всегда равны напряжениям источника. Изменится ток в нейтральном проводе.

4. Как изменится режим работы цепи при обрыве нейтрального провода?

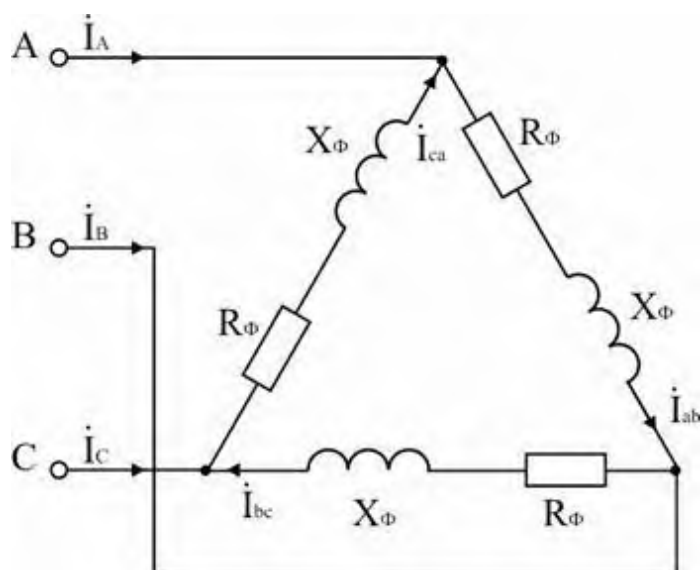
При несимметричной нагрузке при обрыве нейтрали между точками "N" источника и "n" нагрузки появляется напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_{nN}$, и искажается звезда фазных напряжений на нагрузке, т.е. на каких-то фазах нагрузки напряжение будет больше номинального, а на каких-то меньше, что является для нее аварийным режимом. Т.к. нейтрального провода нет, сумма фазных токов равна нулю.

Задача 2. Расчет цепей при соединении треугольником.

В трехфазную сеть с $U_L = 380 \text{ В}$ включен соединенный треугольником трехфазный асинхронный двигатель мощностью $P = 5 \text{ кВт}$, КПД двигателя равен $\eta_n = 90\%$, коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,8$. Определить фазные и линейные токи двигателя, параметры его схемы замещения R_ϕ , X_ϕ , построить векторную диаграмму. Включить ваттметры для измерения активной мощности и найти их показания.

Решение.

Двигатель является активно-индуктивным потребителем энергии, его схема замещения приведена на рисунке.



В паспорте двигателя указывается механическая мощность на валу; потребляемая активная мощности двигателя

$$P = P_H / \eta = 500 / 0.9 = 5560 \text{ Вт.}$$

Для симметричной нагрузки, какой является двигатель,

$$P = 3 U_\Phi I_\Phi \cos \varphi \text{ и } I_\Phi = P / (3 U_\Phi \cos \varphi).$$

$$I_\Phi = 5560 / (3 \cdot 380 \cdot 0.8) = 6.09 \text{ А.}$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi = \sqrt{3} \cdot 6.09 = 10.54 \text{ А.}$$

Расчет параметров схемы замещения двигателя.

$$Z_\Phi = U_\Phi / I_\Phi = 380 / 6.09 = 62.4 \text{ Ом; } R_\Phi = Z_\Phi \cos \varphi = 62.4 \cdot 0.8 = 49.9 \text{ Ом}$$

$$X_\Phi = Z_\Phi \sin \varphi = 62.4 \cdot 0.6 = 37.4 \text{ Ом; } \cos \varphi_\Phi = \cos \varphi_H = 0.8.$$

Построение векторной диаграммы.

Линейные напряжения строятся в виде симметричной звезды, они же являются в данном случае фазными напряжениями. Фазные токи отстают от напряжений на угол φ_Φ , линейные токи строятся по фазным на основании уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа:

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

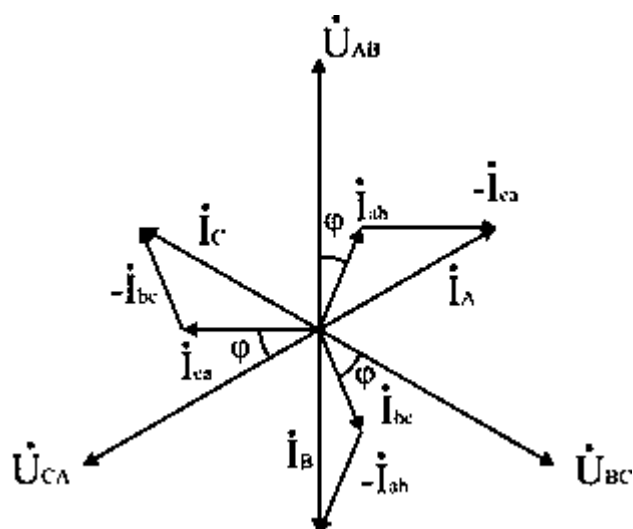


Схема включения ваттметров.

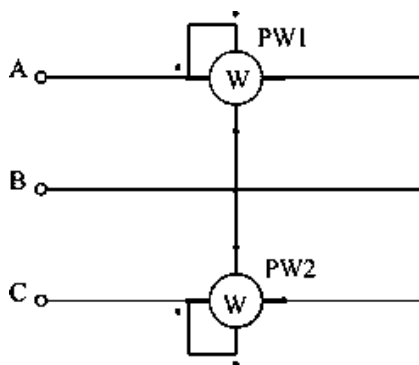
В трехпроводных сетях часто для измерения активной мощности применяется схема двух ваттметров, один из вариантов которой показан на рис. 6.30. Показания ваттметра определяются произведением напряжения, приложенного к его катушке напряжения, на ток в токовой катушке и косинус угла между ними:

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos (\dot{U}_{AB} \wedge \dot{I}_A) = 380 \cdot 10,54 \cdot \cos (\varphi_{\Phi} + 30^{\circ}) = 1573 \text{ Вт};$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos (\dot{U}_{CB} \wedge \dot{I}_C) = 380 \cdot 10,54 \cdot \cos (\varphi_{\Phi} - 30^{\circ}) = 3976 \text{ Вт}.$$

Активная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний приборов:

$$P = P_1 + P_2 = 1573 + 3976 = 5549 \text{ Вт}.$$



Дополнительные вопросы к задаче 2.

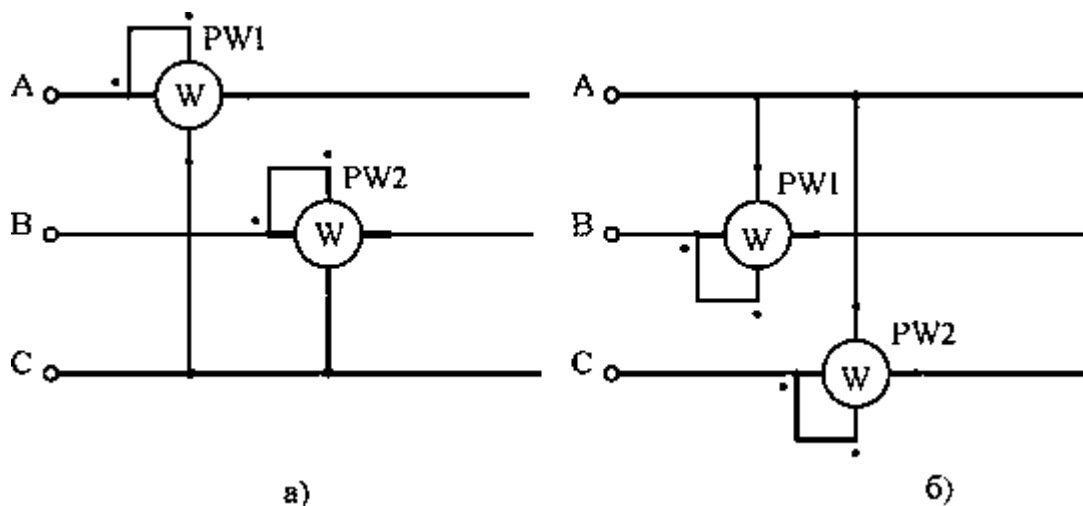
1. Можно ли этот двигатель включать в сеть с $U_{\text{Л}} = 660 \text{ В}$?

Если при соединении треугольником двигатель имеет $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$, его можно использовать при $U_{\text{сети}} = 660 \text{ В}$, соединив фазы звездой, т.к. при этом напряжение на его фазах $U_{\Phi} = 380 \text{ В}$.

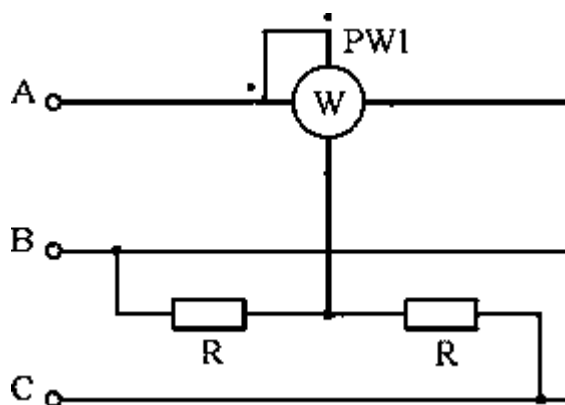
2. Можно ли данный двигатель использовать в сети с $U_L = 380$ В при соединении его обмоток звездой?

Можно, но напряжения на его фазах снижаются в $\sqrt{3}$ раз против номинального, что снижает допустимую мощность на валу; при номинальной нагрузке токи в обмотках двигателя будут больше номинальных.

3. Как еще можно включить ваттметры для измерения активной мощности, потребляемой двигателем?



При симметричной нагрузке можно измерить мощность одним ваттметром, подключив его обмотку напряжения к соответствующему фазному напряжению сети (если доступна нейтральная точка) или создав искусственную точку, при этом прибор измеряет мощность одной фазы, мощность всей цепи $P_{\text{цепи}} = 3 P_W$.



5.4. Тесты для самоконтроля по разделу 5.

1. Трёхфазной системой переменного тока называется совокупность трёх однофазных переменных токов одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых относительно друг друга по фазе на угол
 - А) 180°
 - Б) 120°
 - В) 150°
 - Г) 90°
2. Линейным называют напряжение между
 - А) линейным проводом и нейтралью
 - Б) двумя линейными проводами
 - В) линейным проводом и генератором
 - Г) нет верного ответа
3. Фазное напряжение это напряжение между
 - А) линейным проводом и нейтралью
 - Б) двумя линейными проводами
 - В) линейным проводом и генератором
 - Г) нет верного ответа
4. Если конец первой обмотки трёхфазного генератора соединён с началом второй обмотки, конец второй обмотки с началом третьей, а конец третьей с началом первой, то обмотки соединены
 - А) звездой
 - Б) треугольником
 - В) крестом
 - Г) квадратом
5. Если к началам обмоток генератора присоединяют три линейных провода, а концы обмоток соединяют в узел, то обмотки соединены
 - А) звездой
 - Б) треугольником
 - В) крестом
 - Г) квадратом
6. Устройство, с помощью которого получают трёхфазный ток называется
 - А) электродвигатель
 - Б) трансформатор
 - В) усилитель
 - Г) генератор

7. Линейное напряжение в _____ раз больше фазного
- А) 1,73
 - Б) 2,13
 - В) 1,13
 - Г) 5,73
8. Алгебраическая сумма линейных напряжений всегда равна
- А) 3
 - Б) 2
 - В) 1
 - Г) 0
9. Определить фазное напряжение, если линейное равно 380 В
- А) 50 В
 - Б) 120 В
 - В) 220 В
 - Г) 320 В
10. Почему обрыв нейтрального провода является аварийным режимом?
- А) Изменяются фазные напряжения источника
 - Б) Изменяются линейные напряжения источника
 - В) Изменяются фазные напряжения потребителя
 - Г) Изменяются линейные напряжения потребителя
11. Во сколько раз изменится мощность цепи, если симметричную нагрузку, соединенную по схеме треугольник, при неизменном линейном напряжении включить по схеме звезда?
- А) Увеличится в $\sqrt{3}$ раз
 - Б) Уменьшится в $\sqrt{3}$ раз
 - В) Увеличится в 3 раза
 - Г) Уменьшится в 3 раза
12. Когда возникает напряжение смещения нейтрали?
- А) При отключении нейтрального провода и симметричной нагрузке
 - Б) При соединении потребителя по схеме треугольник
 - В) При отключении нейтрального провода и обрыве одной из фаз
 - Г) При включении нейтрального провода и несимметричной нагрузке

5.5. Задания для самоконтроля по разделу 5.

1. Определить линейное напряжение симметричного генератора, если фазное напряжение равно 127В
2. Определить фазное напряжение симметричной системы, если линейное напряжение равно 380В
3. Асинхронный двигатель, фазы которого соединены треугольником, подключен к сети с линейным напряжением 380В . Определить токи в фазах двигателя и проводах питающей сети при мощности двигателя 8 кВт и коэффициенте мощности $0,8$

6. Электрические измерения.

6.1. Измерения. Стрелочные измерительные приборы.

Основные понятия.

Измерение.

Познавательный процесс, заключающийся в экспериментальном сравнении измеряемой величины с некоторым ее значением принятым за единицу.

Средство измерения (СИ).

Техническое средство используемое для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики (мера, измерительный прибор, измерительный преобразователь, электроизмерительная установка, электроизмерительная информационная система).

Мера.

Средство измерения воспроизводящее физическую величину заданного значения.

Измерительный прибор.

Средство измерения предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме доступной для визуального восприятия наблюдателем.

Измерительный преобразователь.

Средство измерения предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме удобной для дальнейшей обработки, преобразования, хранения и передачи.

Электроизмерительная установка.

Совокупность средств измерения предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме доступной для визуального восприятия наблюдателем.

Электроизмерительная информационная система.

Совокупность средств измерения предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме удобной для дальнейшей обработки, преобразования, хранения и передачи.

Погрешности средств измерений.

Погрешность средства измерения - разница между фиксируемым средством измерения значением физической величины и её истинной величиной.

Классификация погрешностей

Δ — Абсолютные	γ — Приведенные	δ — Относительные
Систематические	$\leftrightarrow$	Случайные
Аддитивные	$\leftrightarrow$	Мультипликативные
Статические	$\leftrightarrow$	Динамические
Основные	$\leftrightarrow$	Дополнительные

Погрешность любого измерения может быть представлена в абсолютной, приведенной и относительной формах:

$$\Delta = A_{\text{изм}} - A, [A, B, \text{ВАр}, \dots]$$

$$\gamma = \pm (\Delta \cdot 100\%) / A_{\text{норм}}, [\%]; \text{ряд: } 0,5\%; 1\%; 1,5\%; \dots$$

$$\delta = \pm (\Delta \cdot 100\%) / A_{\text{изм}}, [\%]; \text{любые значения: } 3,58\%; 6,83\%; \dots$$

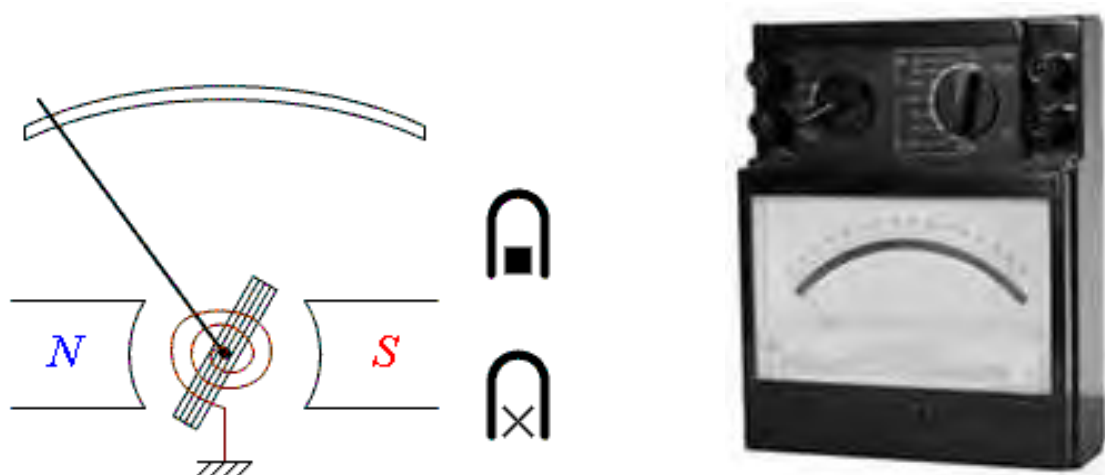
где: A — истинное значение величины;

$A_{\text{норм}}$ — значение физической величины соответствующее полной шкале СИ;

$A_{\text{изм}}$ — оценка истинного значения величины, полученная с помощью СИ.

Стрелочные электроизмерительные приборы.

Магнитоэлектрический измерительный механизм.



Приборы с магнитоэлектрическим измерительным механизмом обладают наибольшей чувствительностью и реагируют на среднее значение измеряемой величины.

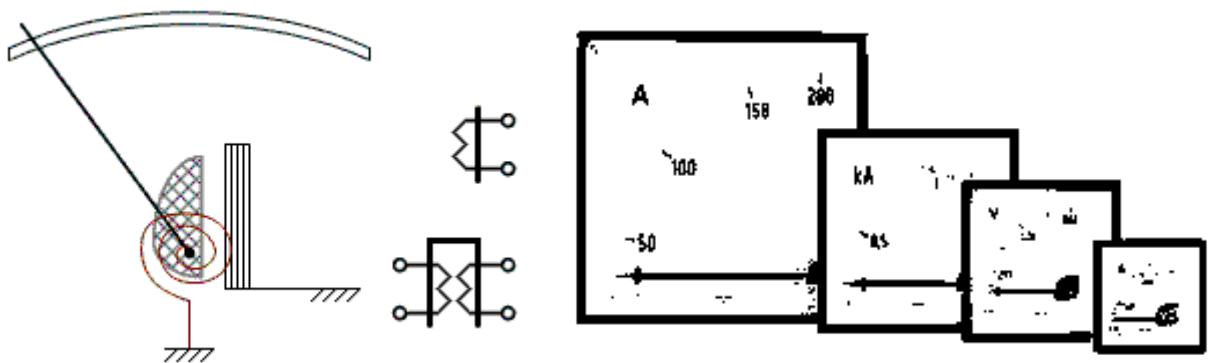
$$\alpha = k \cdot I_{\text{ср}} = k \frac{1}{T} \int i(t) dt$$

Логометр — это прибор, в котором противодействующий момент создается не механическим способом (спиральной пружинкой), а с помощью второй рамки

закрепленной под углом к первой, в которой протекает постоянный ток. Показания магнитоэлектрических логометров пропорциональны отношению средних значений токов.

$$\alpha_{\pi} = k \cdot \frac{I_{\text{cp1}}}{I_{\text{cp2}}}$$

Электромагнитный измерительный механизм.



Приборы с электромагнитным измерительным механизмом наиболее распространены, измеряют постоянные и переменные по знаку величины и реагируют на квадрат действующего значения измеряемой величины (оно же — среднеквадратическое).

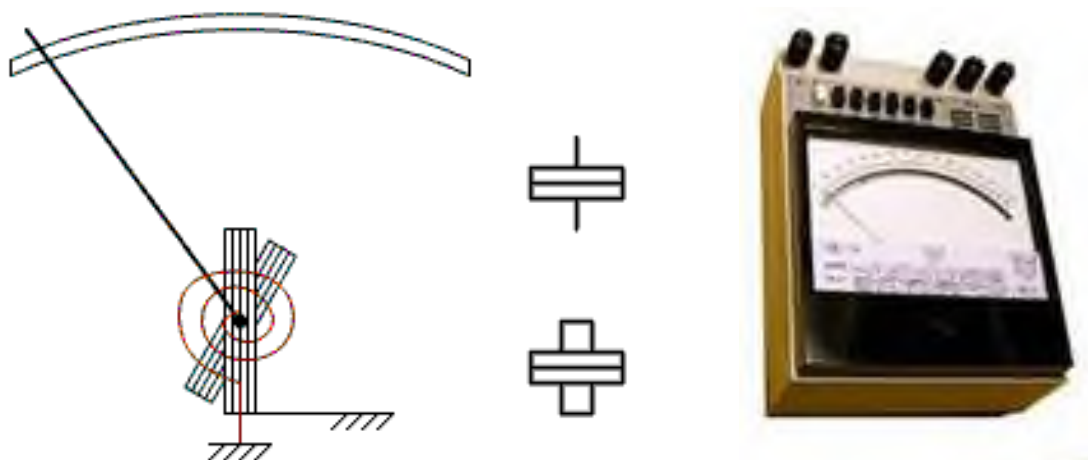
$$\alpha = k \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = k \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int i^2(t) dt \approx k_2 \cdot I$$

Квадратичная шкала не удобна. Подбором формы ферромагнитной пластины, удастся линеаризовать шкалу на большей ее части (кроме начальной — слишком мал вращающий момент).

Показания электромагнитных логометров (с учетом линеаризации шкалы) пропорциональны отношению действующих значений токов:

$$\alpha_{\pi} = k \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} \approx k_2 \cdot \frac{I_1}{I_2}$$

Электродинамический измерительный механизм.



Приборы с электродинамическим измерительным механизмом применяются для измерения активной мощности в цепях переменного тока и реагируют на произведение действующих значений двух измеряемых величин и косинус угла сдвига фаз между ними.

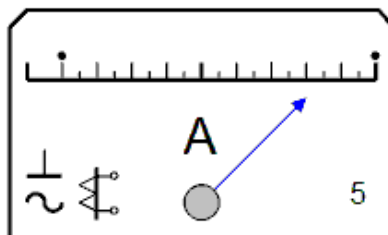
$$\alpha = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

Показания электродинамических логометров пропорциональны отношению фиксируемой в цепи активной мощности к квадрату действующего значения опорного тока.

$$\alpha_{\text{л}} = k \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{I_{\text{оп}}^2} = k_2 \cdot \frac{P}{I_{\text{оп}}^2} = k_3 \cdot P$$

Электродинамические измерительные механизмы обладают максимальной разрешающей способностью в классе электромеханических преобразователей, поскольку не содержат ферромагнитных деталей, технология изготовления которых не может гарантировать отсутствие неоднородностей и характеризуется плохой повторяемостью в серии.

Шкала стрелочного измерительного прибора.



- A — обозначение типа прибора (Амперметр).

для измерения тока — амперметр (A),

для измерения напряжения — вольтметр (B; V),

для измерения электрического сопротивления — омметр, мосты сопротивлений (Ом; Ω),

для измерения мощности — ваттметр (Вт; W)

для измерения электрической энергии — счетчик (КВт · ч; kW · h),

для измерения частоты переменного тока — частотомер (Гц; Hz).

- 5 — обозначение класса точности ($\gamma = 5 \%$).
- Знак катушки с сердечником — обозначение типа измерительного механизма (электромагнитный).

Магнитоэлектрический с подвижной рамкой



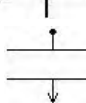
Электромагнитный



Электродинамический



Электростатический



- Знак волны — обозначение рода измеряемого тока (прибор предназначен для измерения переменного тока).

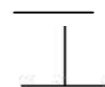
Постоянный ток $\pm$

Переменный ток $\sim$

- Знак перпендикуляра — обозначение одного из условий эксплуатации (механический баланс подвижных деталей прибора рассчитан на вертикальное положение).

Горизонтальное положение шкалы

Вертикальное положение шкалы



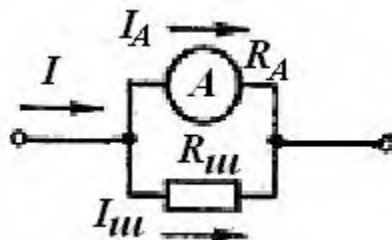
Наклонное положение шкалы под углом к горизонту



- Точка вблизи начала шкалы — обозначение запретной, для измерений, области в начале шкалы.

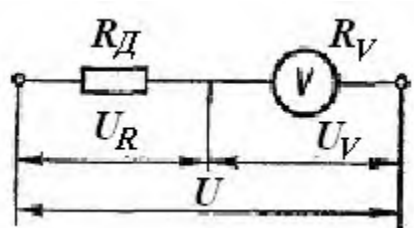
Измерение больших токов и напряжений.

Обмотки катушек состоят из витков тонкого провода, поэтому обычно приборы можно применять непосредственно только в качестве микро- или миллиамперметра и милливольтметра. Для измерения больших токов параллельно зажимам прибора присоединяется **электрический шунт**, представляющий собой прямоугольную манганиновую пластину. Для измерения токов выше 50 А применяют внешние шунты.



Погрешность шунтированного амперметра возрастает вследствие неточности шунтов ($0,005 \div 0,5\%$) и различных температурных коэффициентов сопротивления катушки и шунта.

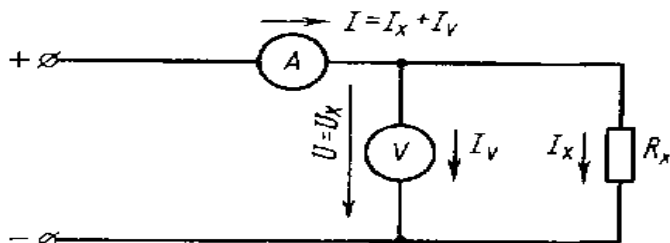
Для измерения больших напряжений последовательно с прибором включают **добавочные резисторы** с сопротивлением R_d .



6.2. Измерение сопротивления, мощности, энергии. Цифровые приборы. Осциллограф.

Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра.

Электрическое сопротивление можно определить с помощью амперметра и вольтметра, пользуясь законом Ома.

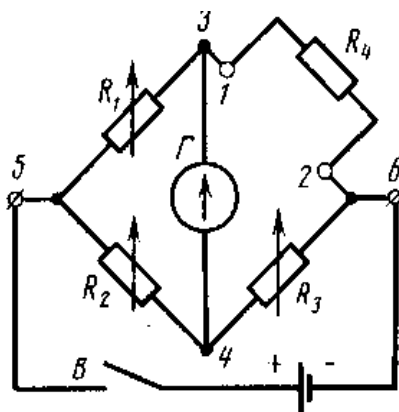


$$R_X = UR_V / (IR_V - U)$$

Если пренебречь R_V , то $R_X = U / I$

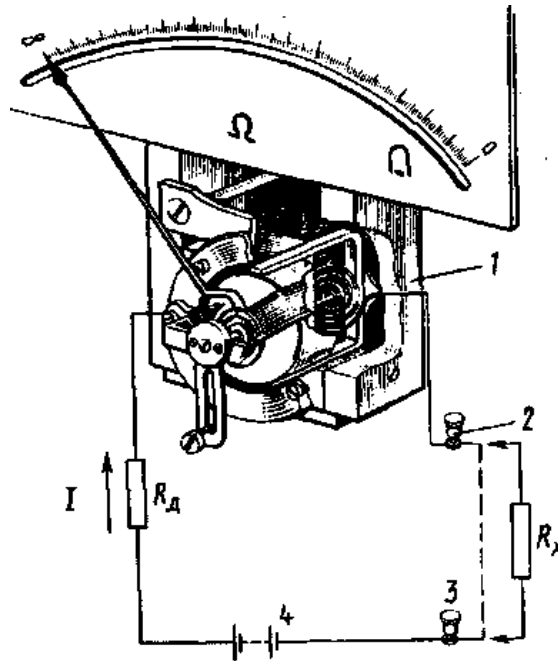
Измерение сопротивлений электрическими мостами.

Мостовая схема состоит из источника питания, чувствительного прибора и четырех резисторов, включаемых в плечи моста: с неизвестным сопротивлением R_X (R_4) и известными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , которые могут при измерениях изменяться. Прибор включают в одну из диагоналей моста (измерительную), а источник питания — в другую (питающую). Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 можно подобрать такими, что при замыкании контакта В показания прибора будут равны нулю (в таком случае принято говорить, что мост уравновешен).



$$R_X = (R_1/R_2)R_3$$

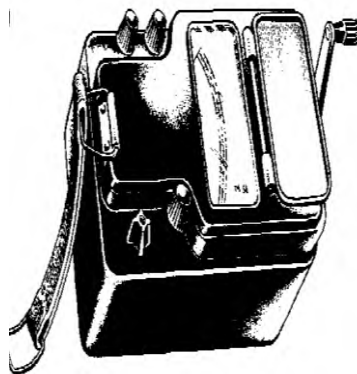
Измерение омметром.



Омметр представляет собой миллиамперметр 1 с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и включается последовательно с измеряемым сопротивлением R_x и добавочным резистором R_d в цепь постоянного тока. При неизменных э. д. с. источника и сопротивления резистора R_d ток в цепи зависит только от сопротивления R_x . Это позволяет отградуировать шкалу прибора непосредственно в Омах. Если выходные зажимы прибора 2 и 3 замкнуты накоротко (см. штриховую линию), то ток I в цепи максимален и стрелка прибора отклоняется вправо на наибольший угол; на шкале этому соответствует сопротивление, равное нулю. Если цепь прибора разомкнута, то $I = 0$ и стрелка находится в начале шкалы; этому положению соответствует сопротивление, равное бесконечности.

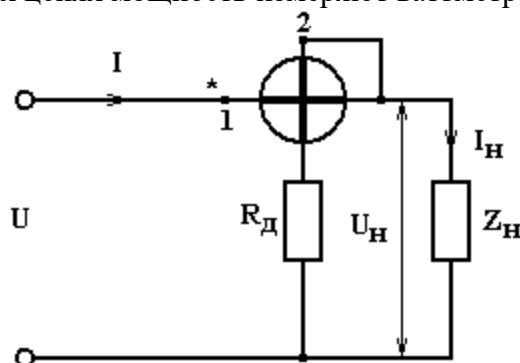
Измерение больших сопротивлений мегаомметрами.

Для измерения сопротивления изоляции чаще всего применяют мегаомметры магнитоэлектрической системы. В качестве источника тока обычно используют небольшой генератор постоянного тока, называемый индуктором; якорь генератора приводят во вращение рукояткой, соединенной с ним через редуктор. Индукторы имеют значительные напряжения от 250 до 2500 В, благодаря чему мегаомметром можно измерять большие сопротивления.



Измерение мощности.

В электрических цепях мощность измеряют ваттметром.



Мощность может быть подсчитана перемножением значений тока и напряжения, измеренных амперметром и вольтметром.

Измерение электрической энергии.

Для учета электрической энергии, получаемой потребителями или отдаваемой источниками тока, применяют счетчики электрической энергии. Счетчик электрической энергии по принципу своего действия аналогичен ваттметру. Однако в отличие от ваттметров вместо спиральной пружины, создающей противодействующий момент, в счетчиках предусматривают устройство, подобное электромагнитному демпферу, создающее тормозящее усилие, пропорциональное частоте вращения подвижной системы. Поэтому при включении прибора в электрическую цепь возникающий вращающий момент будет вызывать не отклонение подвижной системы на некоторый угол, а вращение ее с определенной частотой. Число оборотов подвижной части прибора будет пропорционально произведению мощности электрического тока на время, в течение которого он действует, т. е. количеству электрической энергии, проходящей через прибор. Число оборотов счетчика фиксируется счетным механизмом. Передаточное число этого механизма выбирают так, чтобы по показаниям счетчика можно было отсчитывать не обороты, а непосредственно электрическую энергию в киловатт-часах.

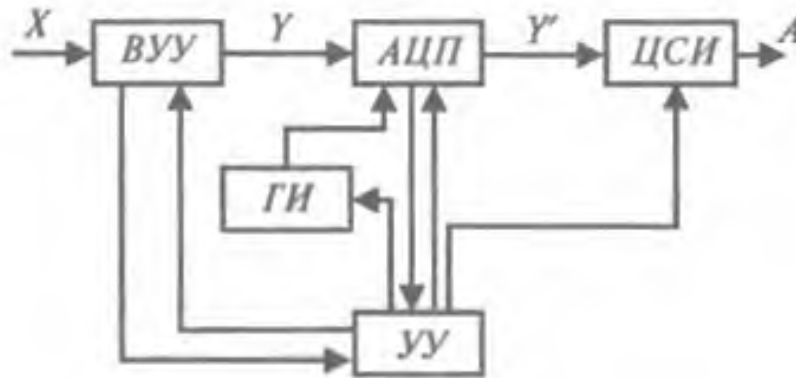
Наибольшее распространение получили ферродинамические и индукционные счетчики; первые применяют в цепях постоянного тока, вторые — в цепях переменного тока. Счетчики электрической энергии включают в электрические цепи постоянного и переменного тока так же, как и ваттметры.



Цифровые электроизмерительные приборы.

Цифровой измерительный прибор - средство измерений, в котором значение измеряемой электрической величины представляется в виде числа на отсчётном устройстве. Применяется для измерений практически всех электрических величин (напряжения, тока, сопротивления, ёмкости, индуктивности и др.). Как правило, цифровой измерительный прибор одновременно выполняет функцию аналого-цифрового преобразователя, преобразуя измеряемую величину в выходной код — совокупность дискретных (импульсных) электрических сигналов, что позволяет регистрировать показания цифropечатающим устройством, передавать их на расстояние, вводить в вычислительное устройство.

Структурная схема цифрового измерительного прибора.



*ВУУ – входное аналоговое измерительное устройство
АЦП – аналого - цифровой преобразователь
ГИ – генератор импульсов
УУ – устройство управления
ЦСИ – цифровая система индикации*



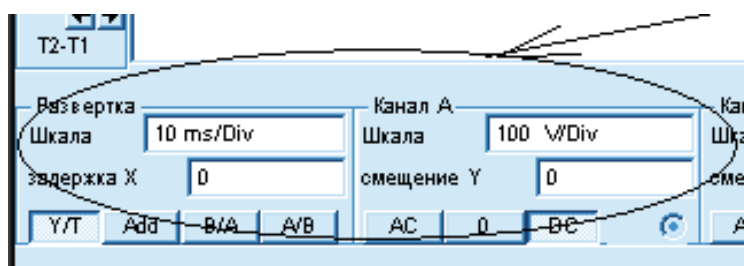
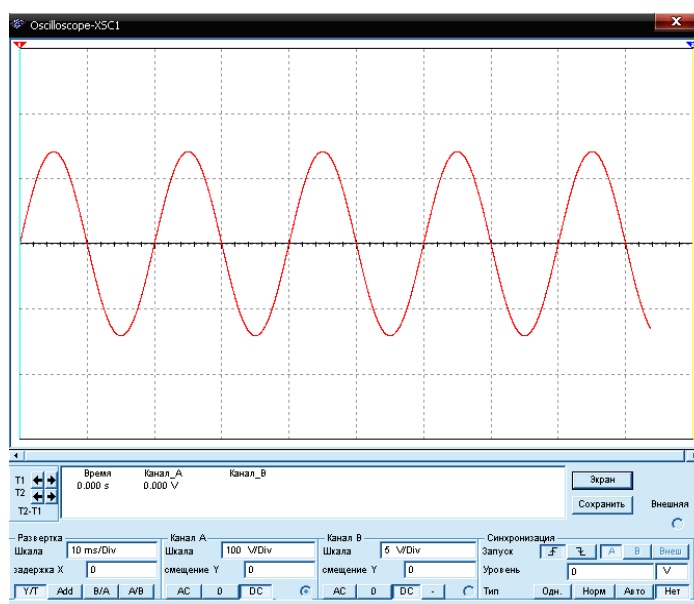
Осциллографы.

Используются в прикладных, лабораторных и научно-исследовательских целях, для контроля/изучения электрических сигналов. По количеству лучей осциллографы бывают однолучевые, двухлучевые и т. д. Количество лучей может достигать 16-ти и более (n-лучевой осциллограф имеет n - ное количество сигнальных входов и может одновременно

отображать на экране п графиков входных сигналов). Различают аналоговые и цифровые осциллографы.



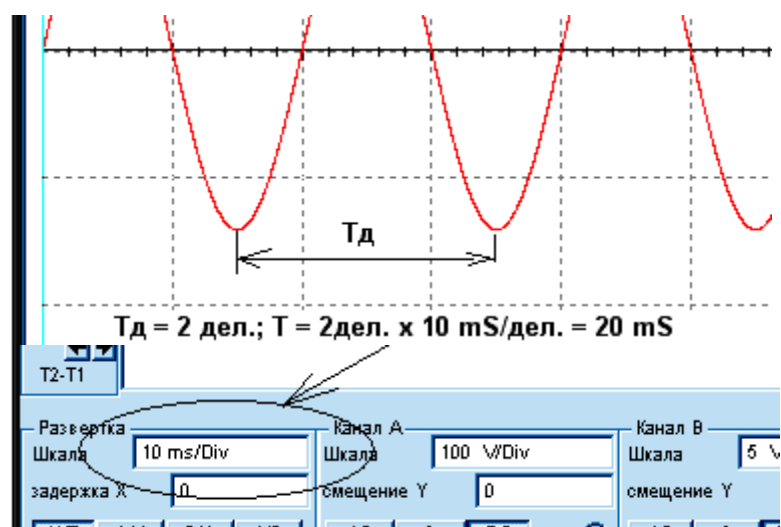
Двухканальный виртуальный осциллограф в обучающей компьютерной программе Electronics Workbench.



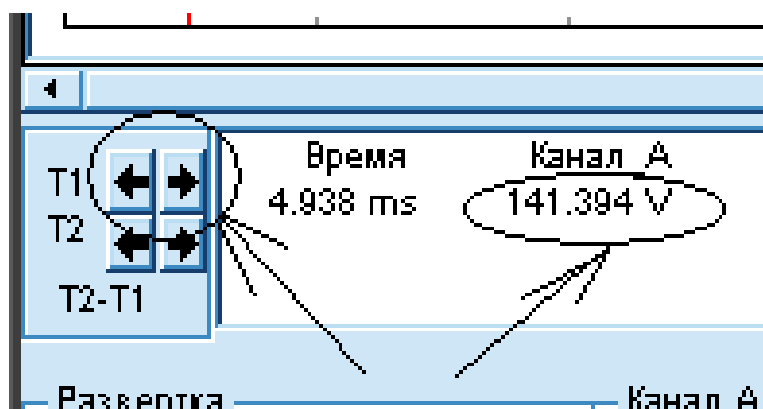
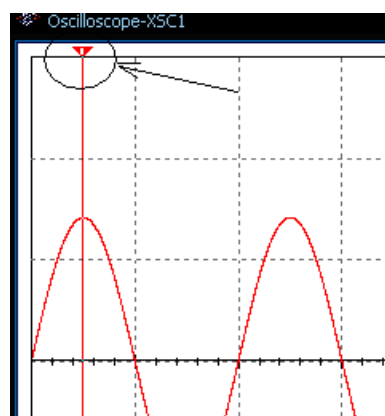
В левом окне «шкала» устанавливается масштаб шкалы времени измерения сигнала в единицах времени на деление (__ / Div). В правом окне «шкала» устанавливается масштаб амплитуды сигнала в единицах напряжения на деление (__ / Div). В окне «смещение Y» устанавливается смещение оси нулевых значений амплитуды сигнала от центрального положения в делениях шкалы напряжений.

Для измерения периода T колебаний сигнала необходимо сначала подсчитать количество делений T_d за период на горизонтальной шкале времени, а затем подсчитать период,

умножив количество делений T_d на цену деления N шкалы времени (параметр левого окна «Шкала»). $T = T_d \cdot N$.



Для измерения максимального напряжения сигнала необходимо приблизить красный флажок в верхней части экрана осциллографа к времени максимального напряжения, а затем клавишами «←» и «→» установить максимальное значение напряжения на поле информации осциллографа (это и есть определяемое максимальное напряжение).



6.3 Тесты для самоконтроля по разделу 6.

1. Современный многофункциональный цифровой прибор для измерения постоянных и переменных токов и напряжений, а так же электрических сопротивлений называется

- А) омметром
- Б) амперметром
- В) мультиметром
- Г) вольтметром.

2. Разность между показаниями прибора и истинным значением измеряемой величины называют _____ погрешностью измерений

- А) случайной
- Б) приведённой
- В) относительной
- Г) абсолютной

3. Прибор для измерения расхода электрической энергии называется

- А) ваттметром
- Б) счётчиком электрической энергии
- В) мультиметром;
- Г) мегаомметром

4. По роду тока электроизмерительные приборы бывают (отметить лишнее)

- А) постоянного тока
- Б) переменного тока
- В) смешанного тока
- Г) постоянно – переменного тока

5. Для измерения электрической мощности используется

- А) омметр
- Б) ваттметр
- В) частотомер
- Г) измерительный мост

6. Для измерения частоты переменного тока используется

- А) омметр
- Б) ваттметр
- В) частотомер
- Г) измерительный мост

7. Электроизмерительные приборы бывают (отметить лишнее)

- А) магнитоэлектрические
- Б) электромагнитные
- В) индукционные
- Г) тиристорные

8. Принцип взаимодействия поля постоянного магнита с проводником (катушкой), по которому протекает измеряемый ток, положен в основу

- А) магнитоэлектрических приборов
- Б) электромагнитных приборов
- В) индукционных приборов
- Г) электродинамических приборов

9. Внешние шунты применяют для измерения

- А) больших токов
- Б) больших напряжений
- В) малых токов
- Г) малых напряжений

10. Какое условное обозначение указывает, что прибор предназначен для работы только в цепях переменного тока?

- А) 
- Б) 
- В) 
- Г) 

11. В какой части шкалы прибора относительная погрешность измерения наименьшая?

- А) в начале шкалы
- Б) в середине шкалы
- В) в конце шкалы
- Г) везде одинаковая

12. Как зависит приведенная погрешность прибора от измеренной величины?

- А) больше в начале шкалы
- Б) больше в середине шкалы
- В) больше в конце шкалы
- Г) не зависит

13. Какая измерительная система имеет наибольшую чувствительность?

- А) электромагнитная.
- Б) магнитоэлектрическая
- В) электродинамическая
- Г) ферродинамические

7. Основные термины и определения.

Векторная диаграмма

совокупность векторов токов и напряжений, построенных на комплексной плоскости, с соблюдением правильной ориентации их относительно друг друга по фазе.

Ветвь электрической цепи (схемы)

участок цепи с одним и тем же током.

Действующие значения периодических переменных тока, напряжения и

ЭДС это среднеквадратичные значения этих величин за время, равное одному периоду.

Ёмкостный элемент (идеальный конденсатор и др.) с ёмкостью C

элемент электрической цепи, учитывающий энергию $W_{\text{э}} = C u^2 / 2$ электрического поля. Характеризуется реактивным емкостным сопротивлением $X_C = 1 / \omega C$, Ом или реактивной емкостной проводимостью $b_C = 1 / X_C = \omega C$, См, где ω – угловая частота.

«Звезда»

схема соединения фаз генератора или потребителя, в которой вместе соединяются концы фаз.

Индуктивный элемент (идеальная индуктивная катушка и др.) с

индуктивностью L это элемент электрической цепи, учитывающий энергию $W_{\text{м}} = L i^2 / 2$ магнитного поля и явление самоиндукции. Характеризуется реактивным индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$, Ом или реактивной индуктивной проводимостью $b_L = 1 / X_L = 1 / \omega L$, См, где ω – угловая частота.

Контур

любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям.

Линейный элемент

элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивления и др.) не зависят от тока в нем.

Линейная электрическая цепь

цепь, все элементы которой являются линейными.

Линейные провода

провода, соединяющие начала фаз генератора и потребителя.

Линейные токи

токи, возникающие в линейных проводах.

Линейные напряжения

напряжения, возникающие между линейными проводами.

Магнитная цепь

совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны при помощи магнитодвижущей силы, магнитного потока и разности магнитных потенциалов.

Независимый контур

контур, в состав которого входит хотя бы одна ветвь, не принадлежащая другим контурам.

Нейтральная точка N

общая точка фаз генератора в схеме соединения «звезда».

Нейтральная точка n

общая точка фаз потребителя в схеме соединения «звезда».

Нейтральный провод

провод Nn соединяющий нейтральные точки генератора и потребителя в схеме «звезда».

Нелинейный элемент

элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) изменяются при изменении величины тока, возникающего в данном элементе.

Нелинейная электрическая цепь

цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент.

Несимметричная трехфазная цепь

электрическая цепь, в которой комплексное сопротивление хотя бы одной фазы отличается от сопротивлений других фаз по величине или характеру нагрузки.

Резистивный элемент с активным сопротивлением R

элемент, учитывающий необратимое преобразование электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, лучистую и др.). Характеризуется активным сопротивлением R Ом или активной проводимостью $g = 1 / R$, См (Сименс).

Симметричная трехфазная цепь

электрическая цепь, в которой комплексные сопротивления каждой её фазы одинаковы.

Схема замещения

расчетная схема реальной электрической цепи, составленная из элементов R, L и C, каждый из которых учитывает одно из явлений, происходящих в реальных элементах электрической цепи.

«Треугольник»

схема соединения фаз генератора или потребителя, в которой вместе соединяются начало одной фазы с концом другой фазы.

Трехфазная электрическая цепь

совокупность электрических цепей, в которой действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты и амплитуды, сдвинутые друг относительно друга по фазе на 120° и создаваемые общим источником.

Узел

место соединения трех и более ветвей.

Фаза

отдельная электрическая цепь, входящая в состав трехфазной цепи.

Фазные токи

это токи, возникающие в фазах генератора или потребителя.

Фазные напряжения

напряжения, возникающие в фазах генератора или потребителя.

Электрическая схема

графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения её элементов и способы их соединения.

Электрическая цепь

совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об ЭДС, токе и напряжении.

10. Ответы к тестам и заданиям для самоконтроля.

Раздел 1.

Ответы к тестам.

1.А); 2.В); 3.В); 4.А); 5.Г); 6.А); 7.А); 8.Б); 9.В); 10.В); 11.Г); 12.Б); 13.А); 14.Г); 15.В)

Ответы к заданиям.

1) $q_0 = 1,5 \cdot 10^{-12}$ Кл; 2) $C = 0,425$ пФ; $C_{сп} = 14$ пФ; 3) $C_{экв} = 8,33$ пФ

Раздел 2.

Ответы к тестам.

1.В); 2.Г); 3.А); 4.А); 5.Б); 6.Б); 7.Г); 8.В); 9.Б); 10.В); 11.Б); 12.В); 13.А); 14.В); 15.В); 16.Б); 17.В)

Ответы к заданиям.

1) $I = 1$ А; $R_{100} = 50,5$ Ом; $\sigma = 1,28 \cdot 10^6$ А/М; 2) $R_{экв} = 22$ Ом; 3) $I = 2$ А;
4) $I_1 = 1,2$ А; $I_2 = 0,2$ А; $I_0 = 1,4$ А; 5) $R_{AC} = 2,2$ Ом; $I_1 = 5$ А; $I_2 = 3$ А; $I_3 = 2$ А;
6) $C_T = 43,3$ коп.; 7) $P = 600$ Вт; $W = 1,8$ кВт · ч; 8) $e = 240$ В; $R_{вн} = 1,25$ Ом;
9) $P = 2120$ Вт; $U_{пр} = 31,7$ В; КПД = 85%; 10) $S = 4$ мм²; 11) $R_{ab} = 20$ Ом;
12) $R_{ab} = 30$ Ом; 13) $I_1 = 2$ А; $I_2 = 0,8$ А; $I_3 = 1,2$ А;
14) $I_1 = 40$ А; $I_3 = 13,33$ А; $I_4 = 26,67$ А; $I_5 = 8,89$ А; $I_6 = 17,78$ А;
15) $U_{AC} = 40$ В; 16) $I_1 = 0,4$ А; $I_2 = -1,2$ А; $I_3 = 1,6$ А; 17) $I_1 = 0,4$ А; $I_2 = -1,2$ А; $I_3 = 1,6$ А;
18) $R = 5$ Ом; 19) $R = 5$ Ом;
20) $I = 0,2$ А; $I_4 = 0,16$ А; $I_5 = 0,04$ А; $I_3 = 0,004$ А; $I_2 = 0,044$ А; $I_1 = 0,156$ А;
21) $R_{ab} = 13$ Ом;
22) $I = 18$ А; $I_1 = 5$ А; $I_2 = 3,38$ А; $I_3 = 2,65$ А; $I_4 = 9,64$ А; $I_5 = 0,72$ А; $I_6 = 10,36$ А

Раздел 3.

Ответы к тестам.

1.В); 2.В); 3.В); 4.Г); 5.Б); 6.Г); 7.Б)

Ответы к заданиям.

1) $B_a = 0$; 2) $B_b = 8 \cdot 10^{-6}$ Тл

Раздел 4.

Ответы к тестам.

1.В); 2.В); 3.Б); 4.Г); 5.В); 6.Б); 7.В); 8.В); 9.А); 10.Г); 11.Г); 12.В); 13.А); 14.Б); 15.Б); 16.А); 17.Г)

Ответы к заданиям.

1) $I = 44 \text{ A}$; $U_1 = 176 \text{ В}$; $U_2 = 352 \text{ В}$; $U_3 = 220 \text{ В}$; $P = 7744 \text{ Вт}$; $Q_L = 15488 \text{ Вар}$; $Q_C = 9680 \text{ Вар}$; $S = 9640 \text{ В} \cdot \text{А}$;

2) $I = 11 \text{ A}$; $\varphi = +24^\circ$; $S = 2387 \text{ В} \cdot \text{А}$; $U_1 = 125,4 \text{ В}$; $U_2 = 55 \text{ В}$; $U_3 = 96,4 \text{ В}$; $U_4 = 101,4 \text{ В}$; $\varphi_1 = 74^\circ 40'$; $\varphi_2 = -36^\circ 50'$; $\varphi_3 = 54^\circ 30'$; $\varphi_4 = -49^\circ 30'$;

3) $I = 10 \text{ A}$; 4) $Z = 0,625 \text{ Ом}$

Раздел 5.

Ответы к тестам.

1.Б); 2.Б); 3.А); 4.Б); 5.А); 6.Г); 7.А); 8.Г); 9.В); 10.В); 11.Г); 12.В)

Ответы к заданиям.

1) $U_L = 220 \text{ В}$; 2) $U_\Phi = 220 \text{ В}$; 3) $I_L = 15,2 \text{ А}$; $I_\Phi = 8,8 \text{ А}$

Раздел 6.

Ответы к тестам.

1.В); 2.Г); 3.Б); 4.В); 5.Б); 6.В); 7.Г); 8.А); 9.А); 10.Б); 11.В); 12.Г); 13.Б)

Список использованных источников.

Основные источники:

1. Основные источники:

Электротехника: учебник / И.О. Мартынова. — Москва: КноРус, 2023. — 304 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://book.ru/books/948719>

2. Электротехника. Лабораторно-практические работы: учебное пособие / И.О. Мартынова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: КНОРУС, 2023. — 136 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/949301>

Дополнительные источники:

1. Электротехника: учебник / С.М. Аполлонский. — Москва: КНОРУС, 2023. — 293 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/>

2. Электротехника. Практикум: учебное пособие / С.М. Аполлонский. — Москва: КНОРУС, 2022. — 318 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/>

3. Электротехника. Практикум (с примерами решения задач): учебное пособие / И.С. Султангараев. — Москва : КНОРУС, 2023. — 182 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/>

4. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. М.: Академия, 2004.

5. Частоедов Л.А. Электротехника. М.: ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2006.

6. Попов В. С. Теоретическая электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1990.

7. Берёзкина Т.Ф., Гусев Н. Г. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. М.: Высшая школа, 1983.

8. Новиков П.Н., Кауфман В.Я., Толчеев О.В. и др. Задачник по электротехнике. М.: Академия, 2006.

Интернет-ресурсы:

1. Справочная система по электронике, электротехнике и радиотехнике. [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://spravochnick.ru/elektronika_elektrotehnika_radiotekhnika/

2. Справочно – образовательный ресурс «Школа для электрика». [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://electricalschool.info/>.

Приложение к рабочей программе по
специальности 23.02.06
Техническая эксплуатация
подвижного состава железных дорог
направление

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ОП.03. Электротехника

для специальности
23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава
железных дорог

базовый уровень

Саратов 2023.

РЕКОМЕНДОВАНО

к использованию в образовательной организации внутри

внутри филиала СамГУПС в г. Саратов

согласно решения методического совета

№1 от 21 сентября 2023 г.

ОДОБРЕНО

на заседании ЦМК

«Техническая эксплуатация
подвижного состава железных дорог»

Протокол № ____ от «__» _____ 20__ г.

Председатель

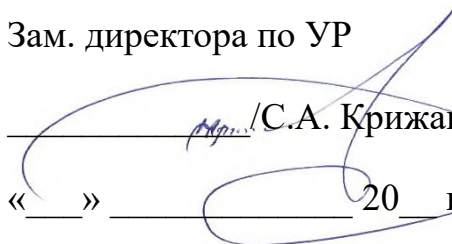


/ Д.К. Гусев /

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС по специальности СПО 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог (приказ Минобрнауки РФ от 22.04.2014 № 388) и на основе профессионального стандарта «Работник по управлению и обслуживанию локомотива» (утв. приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 21 апреля 2022 г. N 226н)

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по УР



/С.А. Крижановский/

«__» _____ 20__ г.

Составители (авторы):

Гусев Д.К., преподаватель филиала СамГУПС в г. Саратове;

Локтионов О.Б., преподаватель филиала СамГУПС в г. Саратове, высшей квалификационной категории;

Мелешкин В.Е., преподаватель филиала СамГУПС в г. Саратове.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Лабораторные работы по учебной дисциплине ОП.03 Электротехника является частью основной профессиональной образовательной программы в соответствии с ФГОС по специальности СПО: 23.02.06 Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог (Приказ Министерства образования и науки РФ №193 от 17.03.2010).

Перечень лабораторных работ по учебной дисциплине ОП.03 Электротехника разработана в соответствии с Примерной программой для специальностей среднего профессионального образования, заключение Экспертного совета ФГАУ «ФИРО» №295 от 16 августа 2011г.

Учебная дисциплина «Электротехника» относится к циклу профессиональных и общепрофессиональных дисциплин и нацелена на развитие у студентов мышления и навыков сборки простейших электрических цепей, определения параметров электрических цепей; выбора электроизмерительных приборов и способов включения электроизмерительных приборов, построения электрических цепей, расчёта их параметров.

Цель проведения лабораторных работ - научить студентов собирать простейшие электрические цепи, определять параметры электрических цепей; выбирать электроизмерительные приборы и элементы схем.

Рекомендуется, выполнение лабораторных работ в рабочей тетради. В результате выполнения заданий рабочей тетради обучающийся должен уметь собирать простейшие электрические цепи, определять параметры электрических цепей; выбирать электроизмерительные приборы и элементы схем.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен знать основные физические процессы, происходящие в электрических и магнитных цепях, способы включения электроизмерительных приборов, построения и расчёта электрических цепей.

В результате изучения данного курса студент должен сформировать следующие **общие компетенции:**

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

ОК 10. Исполнять воинскую обязанность, в том числе, с применением полученных профессиональных знаний (для юношей).

профессиональные компетенции:

ПК 1.1. Эксплуатировать подвижной состав железных дорог.

ПК 1.2. Производить техническое обслуживание и ремонт подвижного состава железных дорог в соответствии с требованиями технологических процессов.

ПК 1.3. Обеспечивать безопасность движения подвижного состава.

ПК 2.3. Контролировать и оценивать качество выполняемых работ

ПК 3.1. Оформлять техническую и технологическую документацию.

ПК 3.2. Разрабатывать технологические процессы на ремонт отдельных деталей и узлов подвижного состава железных дорог в соответствии с нормативной документацией.

Структура методических указаний подчинена основным формам учебной работы и организации самостоятельной работы в виде работы с учебником и электронными лекциями по дисциплине «Электротехника», а также организации практической работы в виде исследовательской работы, с применением обучающих компьютерных программ. Методические указания включает также список основной и дополнительной литературы к курсу.

Контроль умений и знаний по дисциплине производится по каждой лабораторной работе в виде оценки по пятибалльной системе.

При анализе и оценке ответа студента необходимо учитывать:

1. Знание основных понятий по дисциплине «Электротехника»;
2. Знание физических процессов, происходящих в электрических цепях, способы расчёта электрических цепей;
3. Знание типов свойств и способов включения электроизмерительных приборов;
4. Техническую грамотность студента, позволяющую определить глубину понимания студентом вопроса;
5. Умение применять знания, полученные по другим дисциплинам.

Критерии оценки:

Оценка «5» (отлично) – ставится студенту, полностью и правильно выполнившему все практические и исследовательские задания лабораторной работы, понимая происходящие процессы, ответившему полностью на все контрольные вопросы и на дополнительные вопросы при отчёте за лабораторную работу, что соответствует 10 дидактическим баллам.

Оценка «4» (хорошо) – ставится студенту, который допустил незначительные ошибки при выполнении лабораторной работы и в ответах на контрольные вопросы и ответил на дополнительные вопросы при отчёте, что соответствует 8 дидактическим баллам.

Оценка «3» (удовлетворительно) – ставится студенту, который не полностью выполнил задания лабораторной работы, понимая происходящие процессы или(и) не полностью ответил на контрольные вопросы, показав понимание данной темы и ответил на дополнительные вопросы при отчёте., что соответствует 6 дидактическим баллам.

В остальных случаях выставляется оценка «2» (неудовлетворительно).

Оглавление

Введение.	6
1. Лабораторная работа № 1 «Способы включения амперметра, вольтметра, ваттметра».	7
2. Лабораторная работа № 2 «Проверка закона Ома».	9
3. Лабораторная работа №3 «Исследование цепи постоянного тока с последовательным соединением резисторов».	13
4. Лабораторная работа №4 «Параллельное соединение резисторов».	17
5. Лабораторная работа № 5 «Последовательное и параллельное включение резисторов».	
6. Лабораторная работа № 6 «Проверка законов Кирхгофа».	25
7. Лабораторная работа № 7 «Определение мощности потерь в проводах и КПД линии».	28
8. Лабораторная работа №8 «Проверка действия законов электромагнитной индукции».	30
9. Лабораторная работа № 9 «Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности».	34
10. Лабораторная работа № 10 «Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и ёмкости».	38
11. Лабораторная работа № 11 «Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности».	41
12. Лабораторная работа № 12 «Проверка свойств резонанса напряжений».	44
13. Лабораторная работа № 13 «Проверка свойств резонанса токов».	49
14. Лабораторная работа № 14 «Исследование трёхфазной цепи при включении потребителей звездой».	54
15. Лабораторная работа № 15 «Исследование трёхфазной цепи при включении потребителей треугольником».	59
16. Лабораторная работа №17 «Ознакомление с правилами эксплуатации амперметра, вольтметра, ваттметра»	64
17. Лабораторная работа № 17 «Измерение сопротивления».	69
18. Лабораторное занятие № 18. В форме практической подготовки Включение в цепь и проверка однофазного счётчика электрической энергии.	73
19. Лабораторная работа №19 «Измерение активной мощности в трехфазной цепи цель работы».	78
20. Лабораторная работа № 20 «Определение номинала элементов по маркировке на корпусе».....	86

Введение.

Технический прогресс современной техники базируется на применении электротехнических и электронных устройств. В системах электроснабжения и электроподвижного состава железнодорожного транспорта эксплуатируются преобразователи электроэнергии, устройства релейной защиты, электромашины, создаваемые на основе электротехнических и электронных устройств. Уровень их эксплуатации зависит от квалификации работников. Из этого следует, что необходимым условием подготовки кадров для железных дорог является изучение законов электротехники, электротехнических устройств и измерительных приборов.

Электротехника является областью науки, которая занимается изучением электротехнических и магнитных явлений и их техническим использованием в практических целях.

Интенсивное использование электрической энергии связано со следующими ее особенностями: возможностью достаточно простого и экономичного преобразования в другие виды энергии (механическую, тепловую, лучистую и т.д.); возможность централизованного и экономичного получения на различных электростанциях; простой передачи с помощью линий электропередачи с малыми потерями на большие расстояния к потребителям.

Высокая рентабельность и конкурентоспособность современных предприятий базируется на полной механизации и автоматизации производственных процессов. Решение этих задач требует создания автоматизированных систем управления на основе современной электротехнической и электронной аппаратуры и электрооборудования. Во всех отраслях производства с помощью электротехнической аппаратуры осуществляется управление производственными механизмами, автоматизация их работы, контроль за ведением производственного процесса, обеспечение безопасности обслуживания и т.д. Следовательно, функции электротехнических устройств машин настолько значительны по сравнению с их механической частью, что именно они во многом определяют такие важные показатели, как производительность, качество и надежность создаваемой продукции.

В курсе "Электротехника" осуществляется анализ явлений, происходящих в электрических и магнитных цепях. Изучаются вопросы связанные с установившимися и переходными процессами, с расчетами цепей постоянного переменного тока, с устройством и принципом действия трансформаторов, электромагнитных устройств, электрических машин постоянного и переменного тока, информационных электрических машин.

Знание перечисленного материала дает возможность будущим специалистам свободно разбираться в устройстве и принципе действия разнообразной электротехнической аппаратуры, электрических машин и оборудования и грамотно использовать их в практической деятельности.

Проведение практикума по техническому моделированию призвано помочь студентам усвоить умения и навыки применения измерительных приборов для определения параметров электротехнических устройств. В ходе практикума студенты обсуждают теоретические вопросы и выполняют экспериментальные задания.

1. Лабораторная работа № 1 «Способы включения амперметра, вольтметра, ваттметра».

Цель работы

Изучить способы включения амперметра, вольтметра, ваттметра, методы электроизмерений и научиться пользоваться измерительными приборами.

Краткие теоретические сведения.

Амперметр - прибор для измерения силы тока в амперах. В электрическую цепь амперметр включается последовательно с тем участком электрической цепи, силу тока в котором измеряют.

Вольтметр – прибор для измерения напряжения в вольтах. Подключается параллельно нагрузке или источнику электрической энергии.

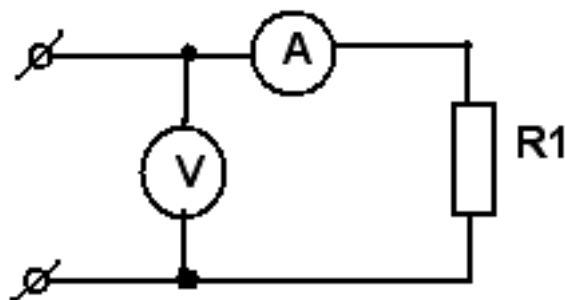
Ваттметр – прибор для измерения электрической мощности. Токовая катушка ваттметра включается последовательно, а катушка для измерения напряжения параллельно.

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд,
- амперметр А;
- вольтметр V;
- ваттметр W;
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы.

1. Подключить вольтметр и амперметр для измерения напряжения и тока по схеме на рисунке и сделать пробные измерения изменяя входное напряжение согласно таблице №1 (прямые измерения).



2. Вычислить мощность при различных значениях напряжения и тока по формуле $P = UI$. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу №1

3. Подключить ваттметр по схеме на рисунке и сделать пробные измерения при тех же значениях входного напряжения. Результаты измерений занести в таблицу №1.

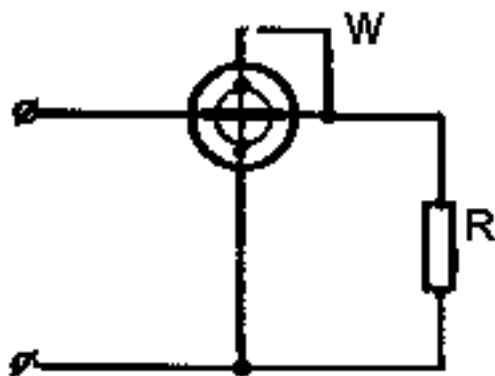


Таблица №1

$U; \text{В}$	$I; \text{А}$	$P; \text{Вт}$ (вычисленное)	$P, \text{Вт}$ (измеренное)
0			
15			
30			
45			
60			
75			

1. Сделать выводы о способах включения различных измерительных приборов и о возможности измерения мощности с помощью амперметра и вольтметра.

Контрольные вопросы.

1. Для чего используются амперметры и вольтметры?

2. Какими способами можно измерить электрическую мощность?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

2. Лабораторная работа № 2 «Проверка закона Ома».

Цель работы:

Опытным путём убедиться в справедливости закона Ома для участка цепи.

Краткие теоретические сведения.

Зависимость между силой тока на участке проводника и напряжением определяется законом Ома. Закон Ома для участка цепи определяет: **сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению между его концами и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.**

$$I = \frac{U}{R},$$

где **R-электрическое сопротивление.** Измеряется в **Омах (Ом).**

При прохождении тока по проводу, свободные электроны, перемещаясь под действием сил электрического поля, сталкиваются с атомами и молекулами провода и тормозятся, т. е. они испытывают противодействие, которое называется **сопротивление.**

$$R = \frac{U}{I}.$$

Поэтому Ом = В/А. Сопротивление в 1 Ом имеет проводник, в котором устанавливается ток 1А при напряжении на его концах 1 В.

Необходимое оборудование:

Персональный компьютер с установленной обучающей программой Circuit Simulator.

Порядок выполнения работы:

1. Загрузить программу Circuit Simulator.
2. Собрать виртуальную схему согласно рисунка:



3. Сопротивление R_1 выставить, согласно своего варианта, в таблице №1.

Таблица №1

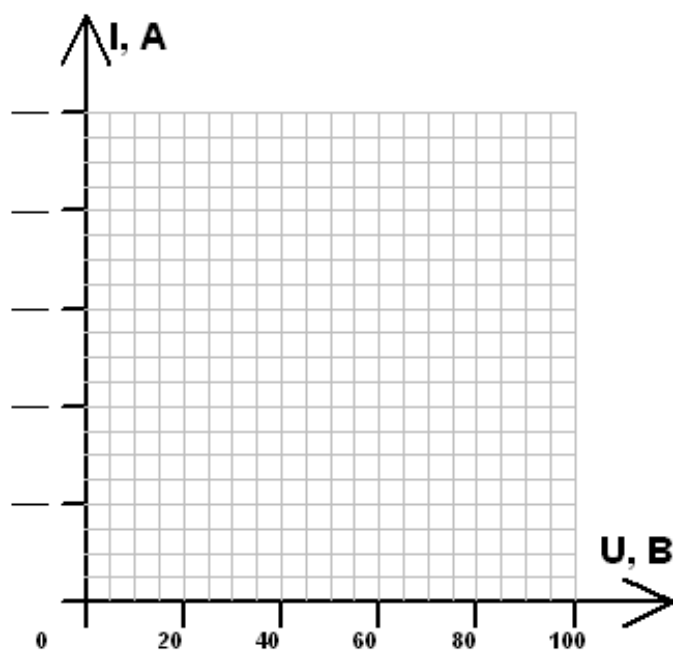
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R_1 ; Ом	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
R_1 ; Ом	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155

4. Включить схему. Изменяя напряжение на источнике, согласно таблице №2 измерять силу тока в цепи. Результаты измерений занести в таблицу №2.

Таблица №2

U	I	R (согласно варианта)
В	А	Ом
0		130
20		130
40		130
60		130
80		130
100		130

5. Построить график $I = f(U)$, при $R = const$, на основании таблицы №2.



6. Выставить U на источнике, согласно своего варианта, в таблице №3.

Таблица №3

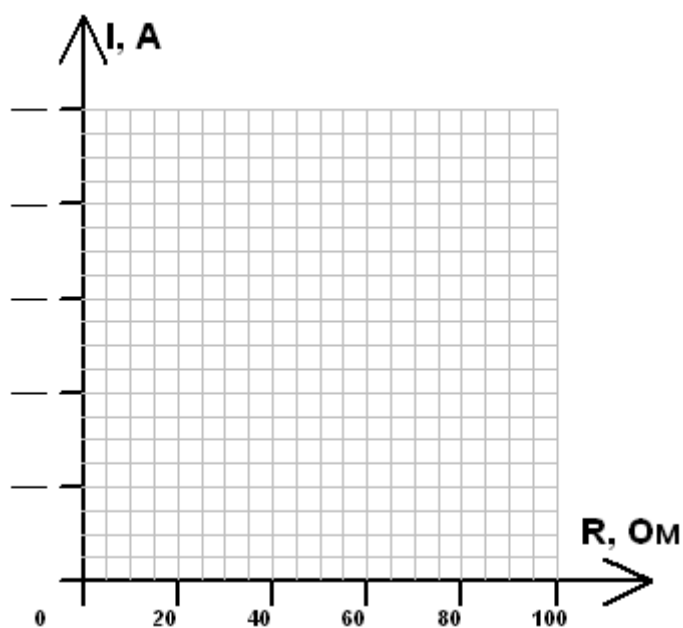
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U ; В	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U ; В	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310

7. Включить схему. Изменяя сопротивление резистора R_1 , согласно таблице №4 измерять силу тока в цепи. Результаты измерений занести в таблицу №4.

Таблица №4

R	I	U (согласно варианта)
Ом	А	В
20		90
40		90
60		90
80		90
100		90

8. Построить график $I = f(R)$, при $U = const$, на основании таблицы №4.



9. Сделать выводы о зависимости силы тока от напряжения при постоянном сопротивлении и о зависимости силы тока от сопротивления при постоянном напряжении.

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте Закон Ома.

2. Что называется электрическим током?

3. В каких единицах измеряется электрическое сопротивление?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

3. Лабораторная работа №3 «Исследование цепи постоянного тока с последовательным соединением резисторов».

Цель работы:

Проверить на опыте особенности последовательного соединения резисторов.

Краткие теоретические сведения.

Если потребители электрической энергии включены так, что образуют неразветвленную цепь и по ним проходит один и тот же ток, то такое соединение потребителей называется последовательным. Падение напряжения на каждом потребителе можно определить по закону Ома:

$$\begin{aligned}U_1 &= I \times R_1; \\U_2 &= I \times R_2; \\U_3 &= I \times R_3.\end{aligned}$$

Каждое сопротивление потребителя может быть найдено по формулам:

$$\begin{aligned}R_1 &= \frac{U_1}{I}; \\R_2 &= \frac{U_2}{I}; \\R_3 &= \frac{U_3}{I}.\end{aligned}$$

Приложенное к цепи напряжение равно сумме падений напряжений на каждом резисторе:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Эквивалентное сопротивление неразветвленной цепи равно сумме сопротивлений каждого резистора:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Ток в этой цепи может быть найден по формуле

$$I = \frac{U_1}{R_{\text{экв}}},$$

или

$$I = \frac{E}{R},$$

где $R = R_{\text{экв}} + R_{\text{в}}$; где $R_{\text{в}}$ - внутреннее сопротивление источника.
Следовательно

$$R_{\text{экв}} = \frac{U}{I}.$$

Если сопротивления резисторов равны, то эквивалентное сопротивление может быть найдено по формуле

$$R_{\text{экв}} = n \times R,$$

где n — число последовательно соединенных резисторов.

Мощность резистора можно определить по формуле

$$P_1 = U_1 \times I = I^2 \times R_1 = \frac{U_1^2}{R_1}.$$

Для остальных резисторов аналогично.

Общая мощность всех последовательно соединенных резисторов может быть найдена по формуле

$$P_1 = U \times I = I^2 \times R_1 = \frac{U_1^2}{R_{\text{экв}}}$$

или

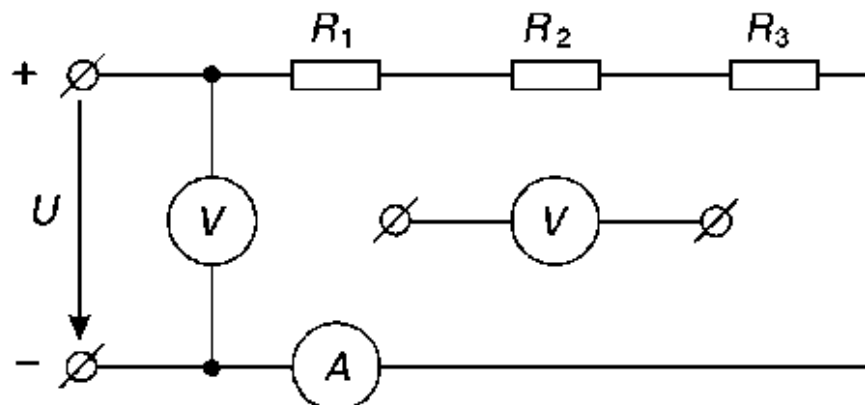
$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Необходимое оборудование:

- лабораторный стенд,
- амперметр А;
- вольтметр V;
- резисторы;
- соединительные провода

Порядок выполнения работы:

1. Собрать схему, согласно рисунка 1:



- После проверки схемы преподавателем включить цепь, установить необходимое напряжение.
- Измерить силу тока в цепи, падение напряжения на каждом участке при трех значениях сопротивлений резисторов и электродвижущую силу (ЭДС) источника. Результаты записать в табл. №1:

Таблица №1

Измеренная величина						Расчетная величина									
$E,$ В	$I,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$U_3,$ В	$U,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$R_{\text{в}},$ Ом	$R,$ Ом	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт

- Для цепи с последовательным соединением резисторов рассчитать сопротивление и мощность каждого резистора.
- Определить внутреннее сопротивление источника питания $R_{\text{и}}$, эквивалентное сопротивление потребителей $R_{\text{экв}}$, сопротивление R и мощность P всей цепи.
- Проверить баланс мощностей для данной цепи.

Контрольные вопросы:

- Сформулировать второй закон Кирхгофа.

- Сформулировать закон Ома для участка цепи.

- Записать формулу закона Ома для полной цепи.

- На каком из двух последовательно соединенных резисторов будет большее падение напряжения?

5. По каким формулам можно найти мощность, потребляемую резистором?

6. Как распределяются напряжение и мощность между последовательно соединенными резисторами?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

4. Лабораторная работа №4 «Параллельное соединение резисторов».

Цель работы:

Проверить на опыте особенности параллельного соединения резисторов.

Краткие теоретические сведения.

Если участки электрической цепи подключены к одной паре узлов, то такое соединение называется параллельным. При этом цепь получается разветвленной. Особенность такого соединения: ко всем параллельным ветвям приложено одно и то же напряжение:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

Сила токов в параллельных ветвях обратно пропорциональна сопротивлениям:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1}; \\ I_2 &= \frac{U}{R_2}; \\ I_3 &= \frac{U}{R_3}. \end{aligned}$$

Каждое сопротивление может быть найдено по формулам:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{U}{I_1}; \\ R_2 &= \frac{U}{I_2}; \\ R_3 &= \frac{U}{I_3}. \end{aligned}$$

Сила тока в неразветвленной части цепи может быть найдена по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}}$$

или

$$I = \frac{U}{R},$$

где E — ЭДС источника; $R = R_{\text{экв}} + R_{\text{в}}$; $R_{\text{в}}$ — внутреннее сопротивление источника.

Или сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов всех ветвей в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Эквивалентное сопротивление двух ветвей определяется по формуле

$$R_1 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2},$$

трех ветвей —

$$R_1 = \frac{R_1 \times R_2 \times R_3}{R_1 \times R_2 + R_2 \times R_3 + R_1 \times R_3}.$$

Если сопротивления ветвей равны, то эквивалентное сопротивление параллельного соединения будет находиться по формуле:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n},$$

где n — число параллельных ветвей.

Эквивалентная проводимость при параллельном соединении определяется как сумма проводимостей ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3,$$

где проводимость каждой ветви можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{1}{R_1}; \\ g_2 &= \frac{1}{R_2}; \\ g_3 &= \frac{1}{R_3}. \end{aligned}$$

Для n одинаковых резисторов эквивалентная проводимость

$$g_{\text{экв}} = n \times g.$$

Силы токов в ветвях находятся по формулам:

$$\begin{aligned} I_1 &= U \times g_1; \\ I_2 &= U \times g_2; \\ I_3 &= U \times g_3. \end{aligned}$$

Мощность, потребляемая резисторами при параллельном соединении, можно определить по формуле

$$P_1 = U \times I_1 = I_1^2 \times R_1 = \frac{U^2}{g_1}.$$

Для остальных резисторов аналогично.
 Общая мощность всех параллельно соединенных резисторов может быть найдена по формуле

$$P = U \times I = I^2 \times R_{\text{экв}} = \frac{U^2}{R_{\text{экв}}} = U^2 \times g_{\text{экв}}$$

или

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Необходимое оборудование:

- лабораторный стенд,
- амперметр А;
- вольтметр V;
- резисторы;
- соединительные провода

Порядок выполнения работы:

1. Собрать цепь по рис. 1.5.1. Показать ее преподавателю для проверки.

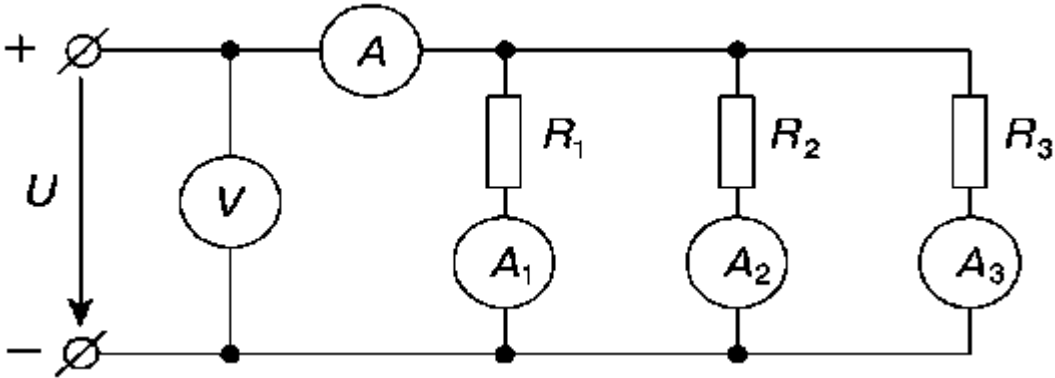


Рис. 1.

2. Включить цепь, установить необходимое напряжение.
3. Измерить ЭДС источника, силу токов в ветвях и приложенное напряжение при трех значениях сопротивлений резисторов. Результаты измерений записать в табл. 1.

Измеренная величина						Расчетная величина													
U, В	I, А	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	E, В	R _в , Ом	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R _{экв} , Ом	R, Ом	g ₁ , См	g ₂ , См	g ₃ , См	g, См	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	P ₃ , Вт	P, Вт

4. Рассчитать сопротивление, проводимость и мощность каждого резистора и всей цепи.
5. Проверить баланс мощностей для данной цепи.

Контрольные вопросы и задания:

1. Сформулировать и подтвердить первый закон Кирхгофа.

2. Каково распределение токов в параллельных ветвях?

1. В какой из двух параллельных ветвей будет больший ток?

4. Как рассчитать проводимость ветвей и эквивалентную проводимость при параллельном соединении резисторов?

5. Как определить эквивалентное сопротивление при трех параллельно соединенных резисторах?

6. Какие существуют способы нахождения токов в параллельных ветвях?

7. По каким формулам можно найти мощность, потребляемую резистором?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

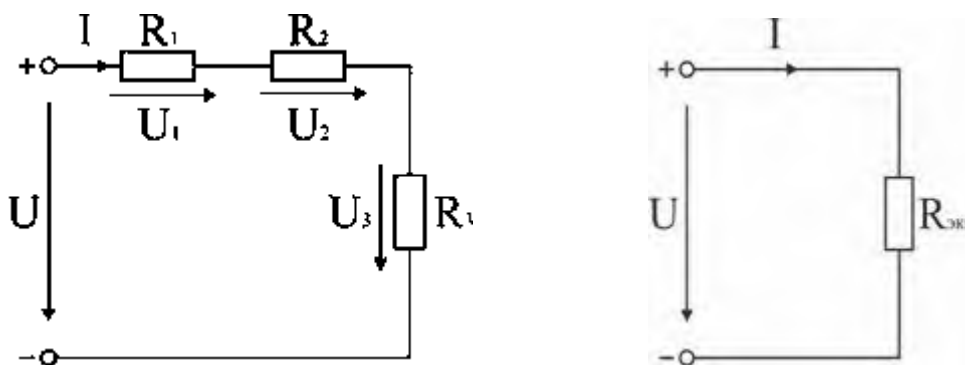
5. Лабораторная работа № 5 «Последовательное и параллельное включение резисторов».

Цель работы:

Опытным путём проверить соотношения между величинами в цепи постоянного тока с резисторами, включёнными последовательно и параллельно.

Краткие теоретические сведения.

Электрическая цепь с последовательным соединением элементов.

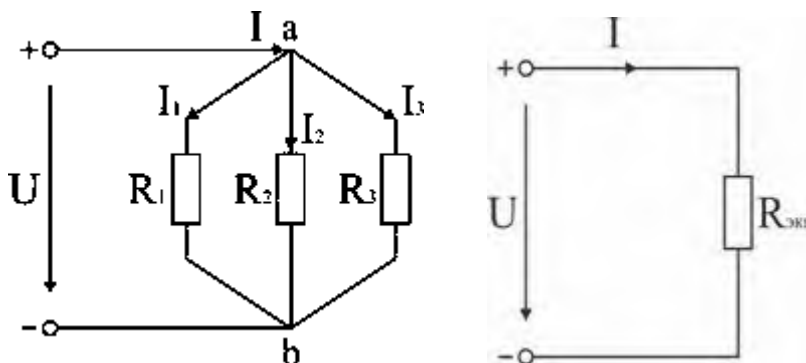


Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором во всех включенных в цепь элементах возникает один и тот же ток I ($I = I_1 = I_2 = I_3$). Общее напряжение U всей цепи равно сумме напряжений на отдельных участках: $U = U_1 + U_2 + U_3$ или $IR_{\text{экв}} = IR_1 + IR_2 + IR_3$, откуда следует

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Таким образом, при последовательном соединении элементов цепи общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков.

Электрическая цепь с параллельным соединением элементов.



В этом случае напряжение $U = U_1 = U_2 = U_3$, а общий ток I всей цепи равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей: $I = I_1 + I_2 + I_3$, т. е.

$$\frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3},$$

откуда следует, что

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

В том случае, когда параллельно включены два сопротивления R_1 и R_2 , они заменяются одним эквивалентным сопротивлением

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}.$$

Эквивалентная проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3.$$

Необходимое оборудование и приборы.

Персональный компьютер с установленной обучающей программой Circuit Simulator.

Порядок выполнения работы

1. Собрать виртуальную электрическую цепь по схеме 1 на рисунке. Номиналы резисторов установить согласно своего варианта, указанного в таблице №1.

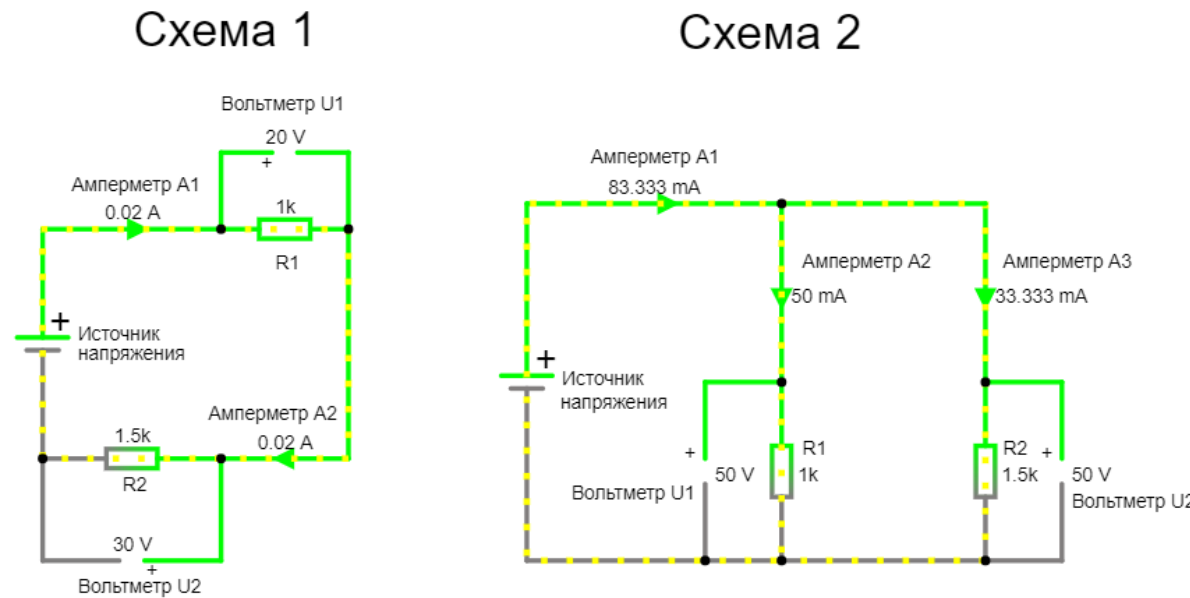


Таблица №1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R1;Ом	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
R2;Ом	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480

2. После проверки схемы преподавателем, установить заданное входное напряжение (50 В), измерить напряжение на резисторах. Показания приборов занести в таблицу №2.

3. Собрать виртуальную электрическую цепь по схеме 2, измерить напряжение на резисторах. Показания приборов занести в таблицу №1.

4. Произвести расчёты величин, указанных в таблице №2

Таблица №2

Участок цепи	Замеры		Расчёт			Примечание
	U	I	P=UI	R=U/I	g =1/R	
	В	А	Вт	Ом	См	
Резистор R1						Последовательное соединение
Резистор R2						
Вся цепь						
Резистор R1						Параллельное соединение
Резистор R2						
Вся цепь						

2. Сделать выводы о соотношении токов и напряжений при различных соединениях.

Контрольные вопросы:

1 Чему равно эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных резисторов $R1$ и $R2$?

2 Для уменьшения тока через резистор $R1$ включим в цепь резистор $R2$. Как должен быть включен резистор $R2$ по отношению к резистору $R1$: последовательно или параллельно? Объяснить ответ.

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

6. Лабораторная работа № 6 «Проверка законов Кирхгофа».

Цель работы:

Опытным путём убедиться в справедливости законов Кирхгофа.

Необходимое оборудование:

Персональный компьютер с установленной обучающей программой Circuit Simulator.

Порядок выполнения работы:

1. Для схемы на рисунке рассчитать все токи (I_1 , I_2 , I_3), согласно данных своего варианта в таблице №1.

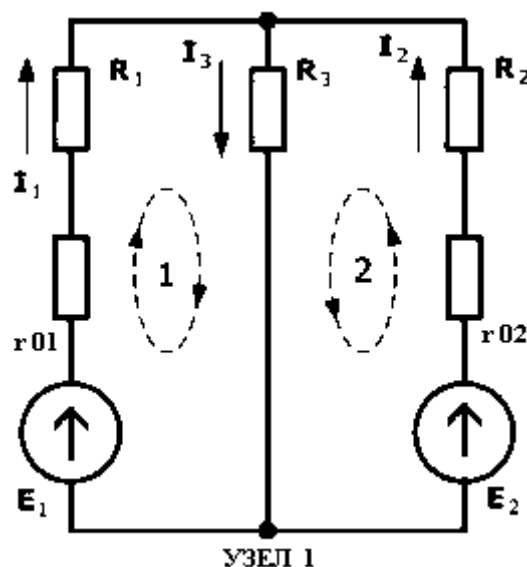


Таблица №1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R1; Ом	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	400	200	900	900	900
R2; Ом	500	600	700	800	900	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
R3; Ом	400	400	400	400	400	300	200	100	500	600	400	400	400	200	100

Для всех вариантов $E_1 = 100$ В, $E_2 = 200$ В, $r_{01} = 500$ Ом, $r_{02} = 200$ Ом.

Методика расчёта токов.

Составим систему уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 - I_3 - I_2 = 0 \quad (\text{по первому закону для узла 1}) \\ I_3 \cdot R_3 + I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot r_{01} = E_1 \quad (\text{по второму закону для контура 1}) \\ I_3 \cdot R_3 + I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot r_{02} = E_2 \quad (\text{по второму закону для контура 2}) \end{array} \right.$$

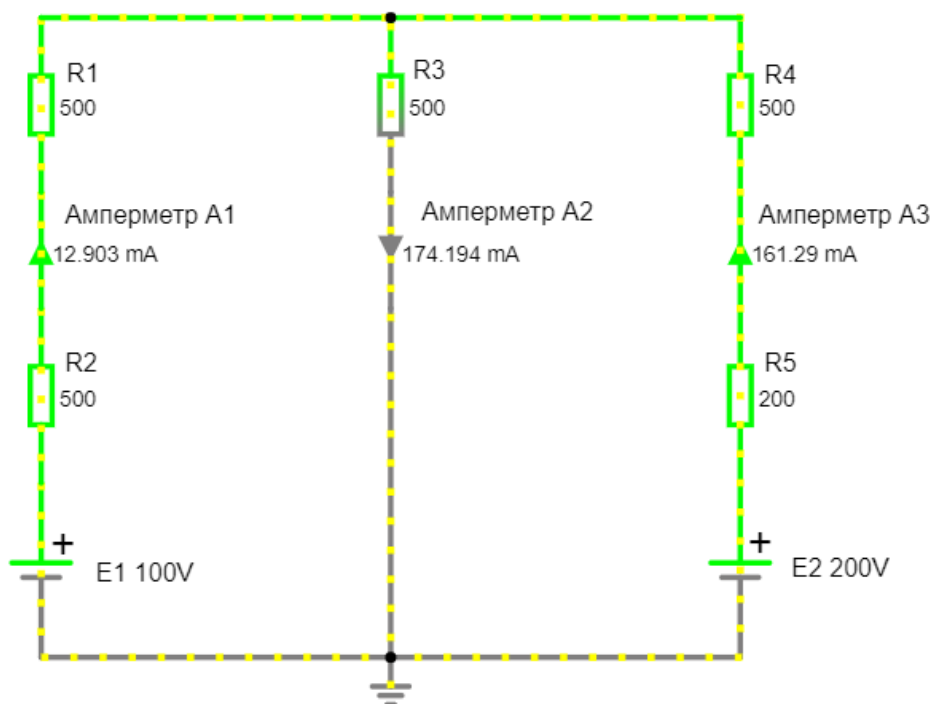
Решив систему, получаем

$$I_3 = \frac{E_1 \times (R_2 + r_{02}) + E_2 \times (R_1 + r_{01})}{(R_1 + r_{01} + R_3) \times (R_2 + r_{02}) + R_3 \times (R_1 + r_{01})};$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + r_{02}} - \frac{I_3 \times R_5}{R_2 + r_{02}};$$

$$I_1 = I_3 - I_2.$$

2. Загрузить программу Circuit Simulator.
3. Собрать виртуальную схему согласно рисунка.



4. Выставить параметры элементов согласно своего варианта.
5. С помощью амперметров измерить токи в цепях.
6. Результаты вычислений и измерений занести в таблицу №2.

Таблица №2

Ток	Расчётное значение	Измеренное значение
I_1 ; A		
I_2 ; A		
I_3 ; A		

7. Сравнить результаты расчётов и измерений и сделать вывод о справедливости законов Кирхгофа.

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте первый закон Кирхгофа

2. Сформулируйте второй закон Кирхгофа

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

7. Лабораторная работа № 7 «Определение мощности потерь в проводах и КПД линии».

Цель работы

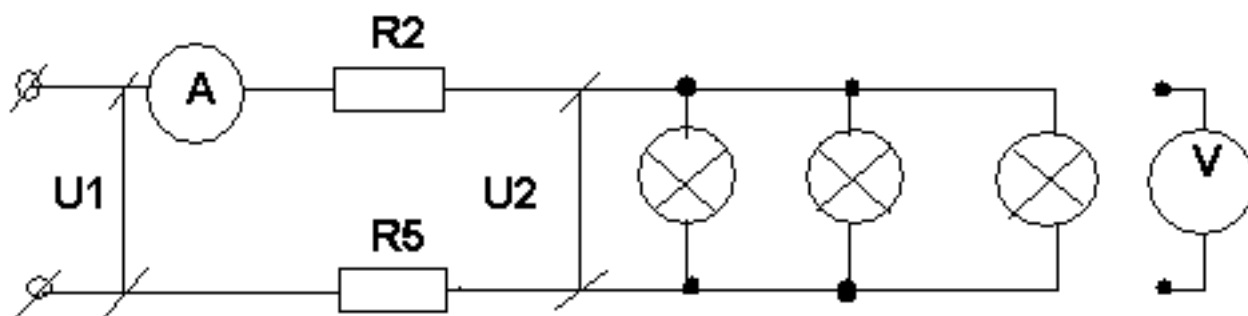
Практически определить мощность потерь в проводах $P_{\text{п}}$ и КПД линии.

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд,
- резисторы R_1 ; R_2 ,
- ламповый реостат A_x ;
- амперметр A (0-1A);
- вольтметр V (0-600В);
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме.



2. После проверки схемы преподавателем установить заданное напряжение U_1 на входе схемы. Переносным вольтметром измерить напряжение U_2 на нагрузке, при условии, что все лампы выключены.

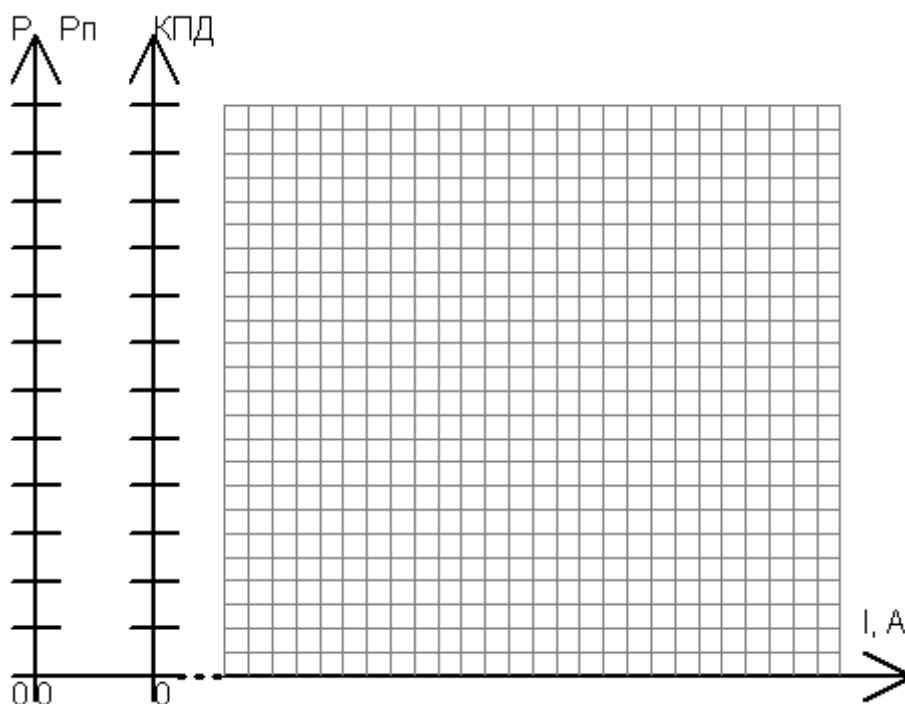
3. Включить одну лампу и повторить замеры, указанные в п.2. В следующих опытах увеличивать по одной число включенных ламп. Результаты измерений занести в таблицу №1.

Таблица №1

U_1	U_2	I	$U_{\text{п}}=U_1-U_2$	P_1	P_2	$P_{\text{п}}=P_1-P_2$	КПД	Примечание
В	В	А	В	Вт	Вт	Вт	%	
								Все лампы выключены
								Включена 1 лампа
								Включены 2 лампы
								Включены 3 лампы

4. По полученным замерам рассчитать потери напряжения, потери мощности и КПД.

5. Построить графики $P = f(I)$, $P_{\text{п}} = f(I)$, $\text{КПД} = f(I)$.



6. Сделать выводы о потерях в проводах.

Контрольные вопросы.

1. Что называется коэффициентом полезного действия ?

2. В чём измеряют количество электрической энергии ?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

8. Лабораторная работа №8 «Проверка действия законов электромагнитной индукции».

Цель работы: практическим путем выявить условия, при которых в контуре возникает электродвижущая сила. Установить факторы, влияющие на величину и направление ЭДС.

Приборы и оборудование:

1. Лабораторный стенд электротехнический
2. 2 магнита полосовых
3. Катушки индуктивности с разным количеством витков
4. Гальванометр магнитоэлектрической системы
5. Амперметр постоянного тока
- 6 Вольтметр постоянного тока
7. Соединительные провода

Краткие теоретические сведения

В основу работы различного рода электромагнитных устройств – электрических машин, реле, магнитных пускателей, датчиков и т.д. – положено преобразование электрической энергии в механическую. Наряду с электрической цепью такие устройства содержат магнитную цепь, которая характеризуется магнитным потоком Φ , магнитным сопротивлением R_m и магнитодвижущей силой F .

Подобно тому, как в электрических цепях ток течет от источника к потребителю по проводам, в магнитных цепях магнитный поток передается от источника к потребителю по магнитопроводу. Если для электрического тока сопротивление проводника характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ , то для магнитного потока сопротивление магнитопровода характеризуется магнитной проницаемостью μ . В зависимости от величины μ различают:

ферромагнитные материалы ($\mu \gg 1$) и *немагнитные материалы ($\mu = 1$)*

К ферромагнитным материалам относятся железо и его сплавы, никель, кобальт, к немагнитным – медь, алюминий, воздух.

Источником магнитного потока в цепях постоянного тока могут служить:

постоянный магнит – специальный сплав железа с кобальтом или барием, характеризующийся значительной остаточной намагничивающей силой.

индуктивная катушка с числом витков W , питаемая постоянным током I и создающая намагничивающую силу IW .

Постоянный магнитный поток замыкается по магнитопроводу, в том числе по рабочему воздушному зазору, где и сосредоточивается основная магнитная энергия, преобразуемая в механическую энергию.

Закон электромагнитной индукции устанавливает количественное выражение для индуцированной ЭДС.

Электродвижущая сила, индуцируемая в замкнутом контуре при изменении сцепленного с ним магнитного потока, равна скорости изменения потокосцепления, взятой с отрицательным знаком:

$$E = - d\Phi / dt$$

В этой форме закон электромагнитной индукции дал Фарадей.

ЭДС катушки определяется скоростью изменения ее общего потокосцепления, и общая формула закона электромагнитной индукции имеет вид

$$E = - d\psi / dt$$

Порядок выполнения

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы.
3. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 10).
4. К катушке имеющей большее количество витков, подключить гальванометр, а к катушке имеющей меньшее количество витков четыре первичных элемента, соединенных последовательно (рис. 10) замкнуть выключатель. Катушку с током вводить и выводить из катушки, соединенной с гальванометром

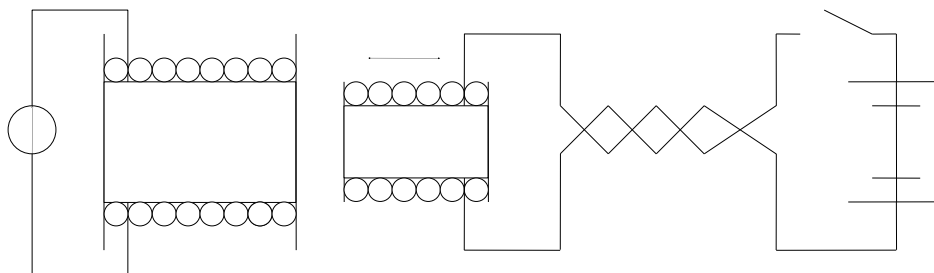


Рис. 10 Электрическая схема для проверки законов электромагнитной индукции

5. Разместить вторую катушку внутри первой, включить и выключить ток во второй катушке, наблюдая за отклонением стрелки гальванометра.
6. Собрать цепь по схеме (рис. 11).

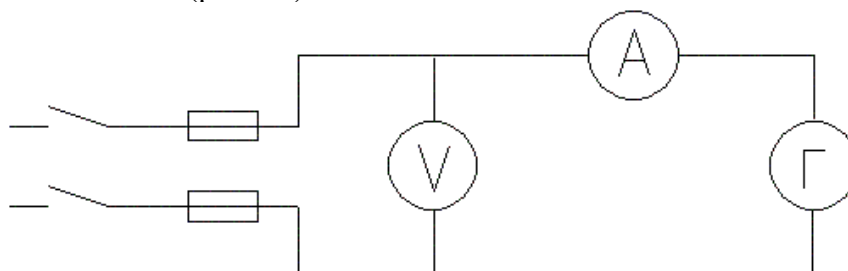


Рис. 11 Электрическая схема для проверки законов электромагнитной индукции

7. После проверки схемы преподавателем включить рубильник и измерить пусковой ток и напряжение. При включенном рубильнике подсчитать сопротивления обмотки якоря двигателя.

$$I_{\text{ном}} = \text{_____ A}$$

$$U = \text{_____ V}$$

$$R_{\text{я}} = \frac{U}{I_{\text{ном.}}}$$

8. Определить величину противо - ЭДС во время холостого хода двигателя

$$E = U - I \times R_{\text{я}} = \text{_____}$$

9. Результаты наблюдений и расчетов показать преподавателю, после его разрешения разобрать цепь и привести в порядок рабочее место.

10. После выполнения работы написать вывод и ответить на контрольные вопросы.

Содержание отчета

1. Электрическая схема для проверки законов электромагнитной индукции
2. Таблица с результатами измерений и вычислений.
3. Ответы на контрольные вопросы.
4. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Из чего состоит магнитная цепь?

2. Что служит источником магнитного потока в цепях постоянного тока?

3. Сформулируйте закон электромагнитной индукции

4. Что такое магнитная проницаемость?

5. Как изменится индукция, если поменять направление тока в катушке или изменить направление ее намотки?

6. Запишите формулы для расчета индукции внутри катушки и поясните их особенности.

8. От каких факторов зависит магнитная индукция?

9. Как направлен вектор магнитной индукции?

Вывод:

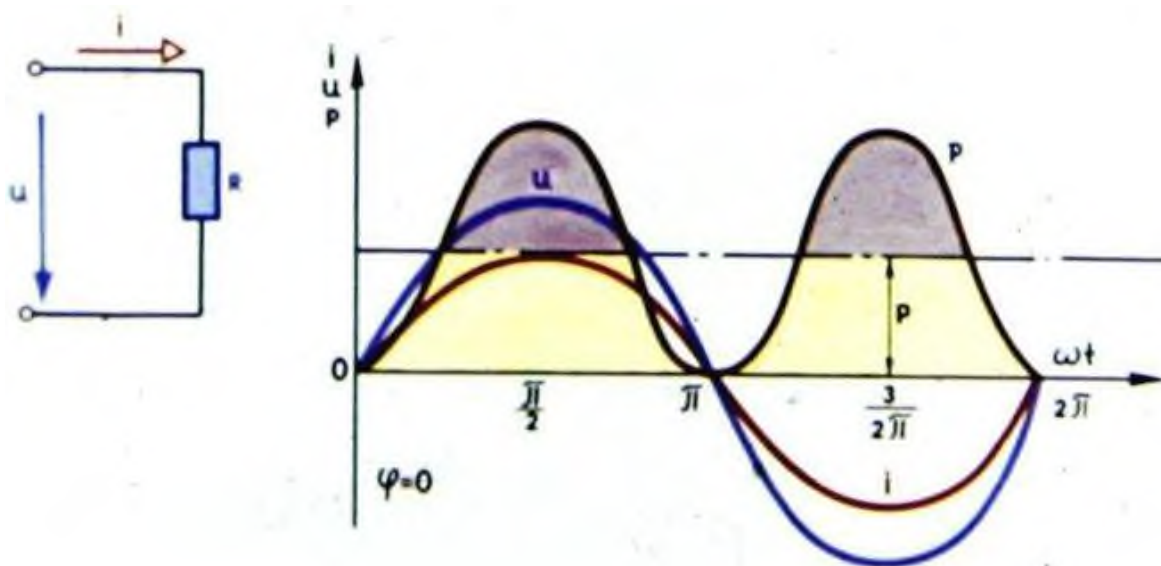
9. Лабораторная работа № 9 «Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности».

Цель работы

Опытным путём проверить основные свойства цепи переменного тока, обладающей активным сопротивлением и индуктивностью.

Краткие теоретические сведения.

Цепь с резистивным элементом.



Мгновенные значения $i = I_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$ $u = U_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$

Действующие значения $U = U_{\text{макс}} / \sqrt{2}$ $I = I_{\text{макс}} / \sqrt{2}$

Активная мощность (средняя за период) $P = UI = I^2 R$ (Вт)

Активное сопротивление $R = P / I^2$

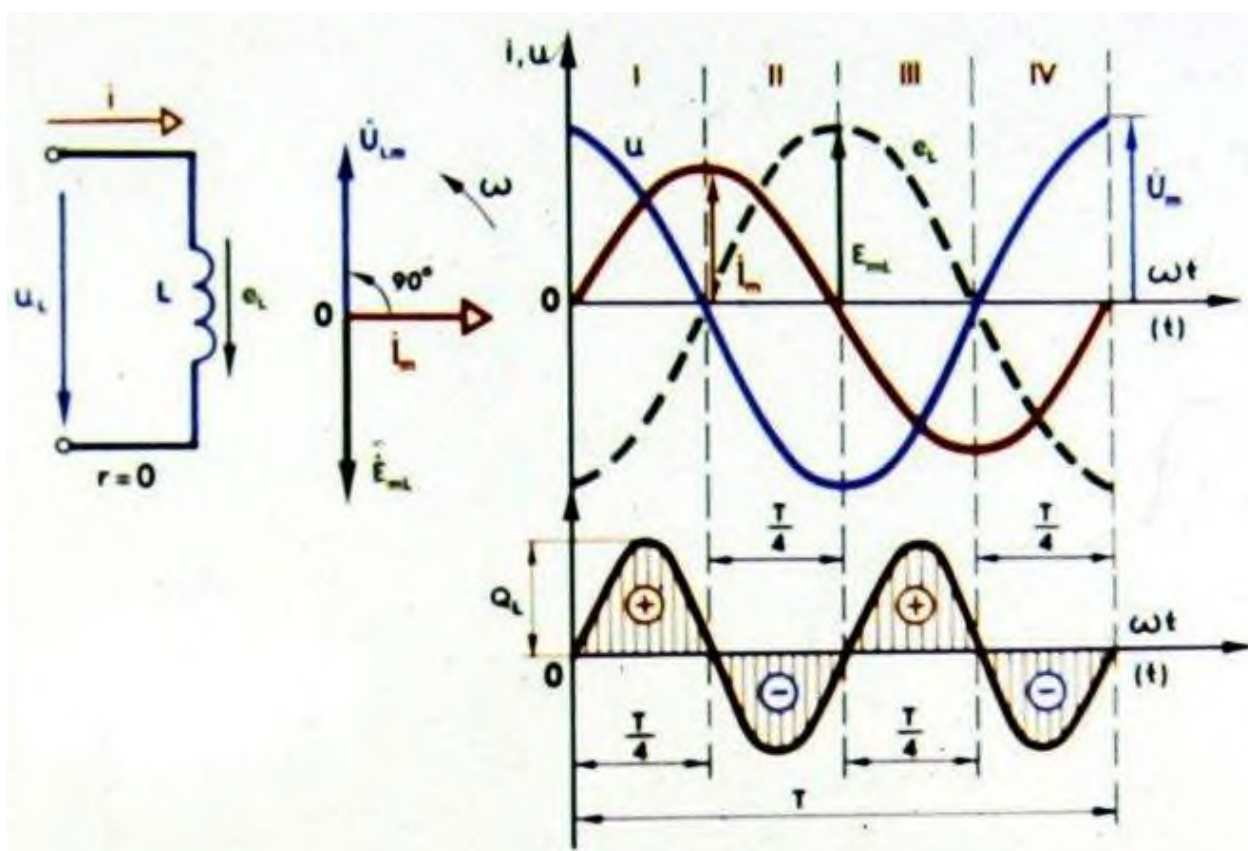
В цепи, содержащей только сопротивление, ток совпадает по фазе с напряжением.



Закон Ома для действующих значений в этой цепи будет иметь такую же форму, как для цепи постоянного тока

$$I = U/r.$$

Цепь с индуктивностью.



Мгновенные значения $i = I_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$ $u = U_{\text{макс}} \cdot \cos \omega t$

Индуктивное сопротивление $X_L = \omega \cdot L$

Максимальное значение мгновенной мощности в такой цепи называется реактивная мощность $Q_L = UI = I^2 \cdot \omega \cdot L$ (Вар)

Единицы реактивной мощности такие же, как у активной, но для ясности, о какой мощности идёт речь называют **вольт – ампер реактивный (вар)**.

ЭДС самоиндукции противодействует изменениям тока, и в цепи, содержащей только индуктивность, ток отстаёт по фазе от напряжения на четверть периода, то есть $\varphi = \pi/2$.

Закон Ома для такой цепи имеет вид:

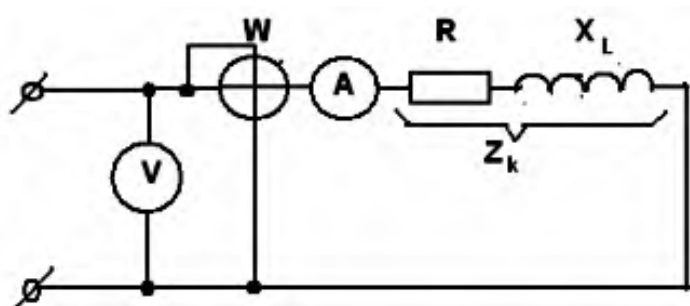
$$I = U/X_L = U/\omega L.$$

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд;
- катушка индуктивности Z_k ;
- ваттметр W ;
- амперметр A (0-1А);
- вольтметр V (0-600В);
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме:



2. После проверки схемы преподавателем включить заданное напряжение и установить в цепи наибольшую величину тока (выдвигая сердечник из катушки). Постепенно вводить сердечник в катушку, останавливаясь на тех значениях тока, которые удобны для отчёта. Показания приборов занести в таблицу №1.

Таблица №1

Показ. приборов			Результаты расчёта								
U	I	P	Z	R	X _L	L	cos φ	U _R	U _L	Q	S
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн		В	В	Вар	ВА

3. Произвести необходимые вычисления. Результаты расчётов занести в таблицу №1. (формулы для расчёта: $Z=U/I$; $R=P/I^2$; $X_L=\sqrt{Z^2-R^2}$; $L=X_L/\omega$, где $\omega=2\pi f$ ($f=50$ Гц); $\cos \varphi = R/Z$; $U_R=U \cdot \cos \varphi$; $U_L=\sqrt{U^2-U_R^2}$; $Q = U_L \cdot I$; $S = U \cdot I$).
4. Построить векторные диаграммы напряжений для первого и пятого опыта. Построение векторной диаграммы начинается с выбора направления вектора тока



- [illegible]

37

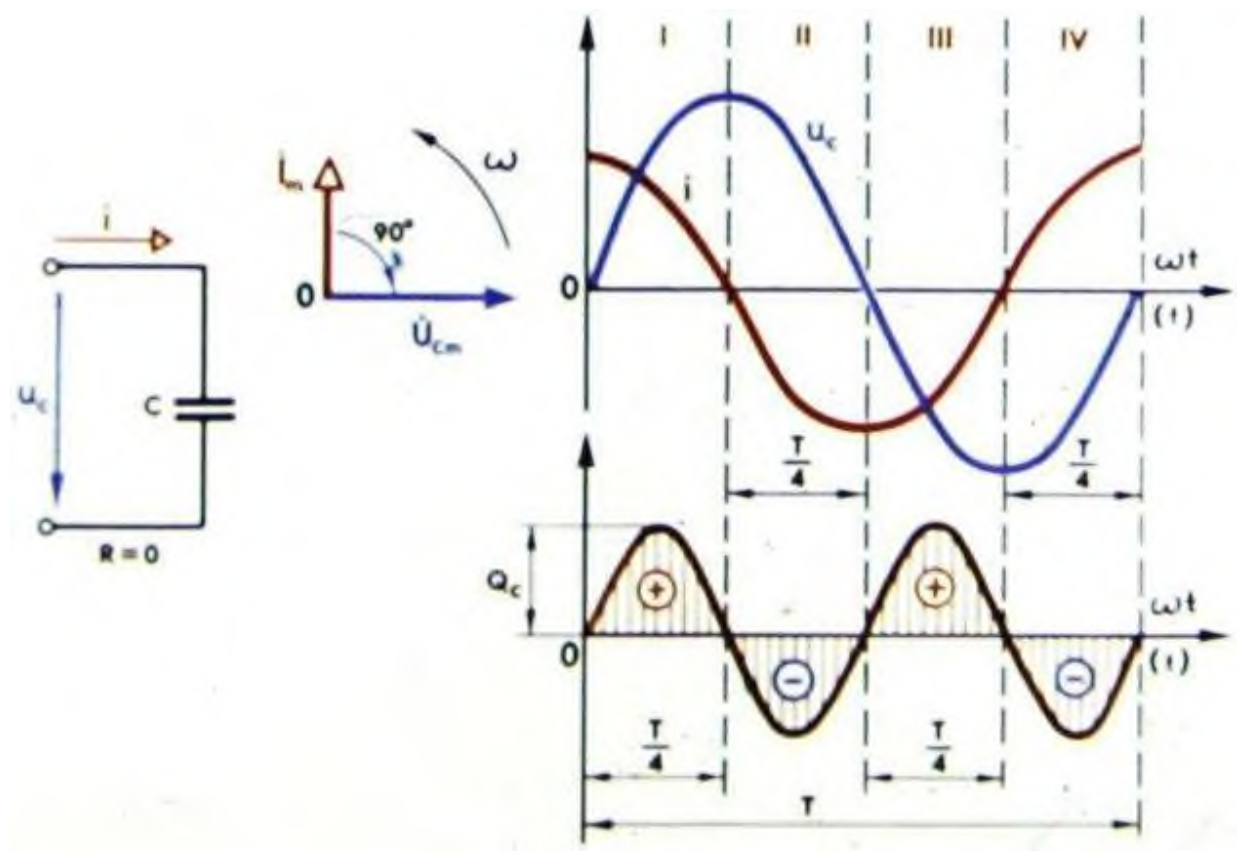
10. Лабораторная работа № 10 «Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления и ёмкости».

Цель работы

Опытным путём проверить основные свойства цепи переменного тока, обладающей активным и ёмкостным сопротивлением.

Краткие теоретические сведения.

Цепь с ёмкостью.



Мгновенные значения $u = U_{\text{макс}} \cdot \sin \omega t$ $i = I_{\text{макс}} \cdot \sin (\omega t + \pi/2)$

Индуктивное сопротивление $X_c = 1/\omega C$

Реактивная мощность $Q_c = UI = \omega C U^2$ (Вар)

Синусоидальный переменный ток, проходящий через ёмкость, опережает по фазе напряжение на четверть периода, то есть $\varphi = -\pi/2$

Закон Ома для такой цепи имеет вид

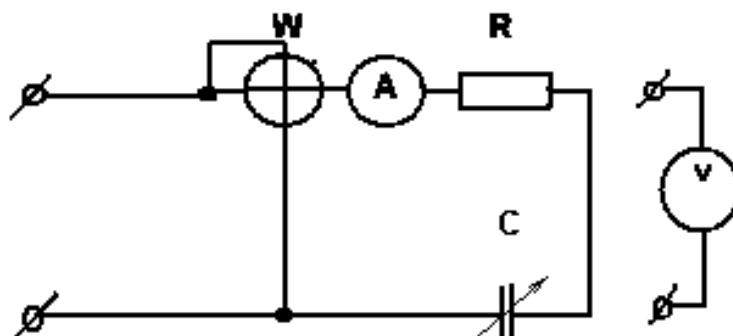
$$I = U\omega C = U/X_C$$

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд;
- магазин ёмкостей C ;
- ваттметр W ;
- амперметр A ;
- вольтметр V ;
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме:



2. После проверки схемы преподавателем, включить заданное напряжение. Установить некоторое значение C . Замерить и записать в таблицу следующие параметры: общее напряжение U ; ток I ; напряжение на сопротивлении U_R ; напряжение на ёмкости U_C и мощность P . Повторить указанные действия 5 раз, каждый раз увеличивая ёмкость C .
3. Результаты измерений записать в таблицу №1.

Таблица №1

Показ. приборов					Результаты расчёта						
U	U_R	U_C	I	P	R	Z	X_C	C	$\cos \varphi$	Q	S
В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Ф		Вар	ВА

4. Произвести необходимые вычисления. Формулы для расчёта: $R=P/I^2$; $Z=U/I$; $X_C=\sqrt{(Z^2-R^2)}$; $C=1/(\omega \cdot X_C)$, где $\omega=2\pi f$ ($f=50$ Гц); $\cos \varphi = R/Z$; $Q = U_C \cdot I$; $S = U \cdot I$.

5. Построить векторные диаграммы для первого и пятого опытов. Построение векторной диаграммы начинается с выбора направления вектора тока (обычно по оси ОХ). Векторная диаграмма тока и напряжения должна быть построена в масштабе по напряжению (например $10 \text{ В} = 1 \text{ см}$), с учётом того, что активное напряжение совпадает по фазе с током, а ёмкостное отстаёт от тока на угол 90° . Угол отставания откладывается от вектора тока по часовой стрелки. Таким образом строим векторные диаграммы согласно расчётным значениям для первого и последнего опытов.

[illegible]

6. Сделать вывод по работе. В выводе должно быть подробно объяснено, почему ток увеличивается с увеличением ёмкости.

[illegible]

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

11. Лабораторная работа № 11 «Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности».

Цель работы:

Научиться рассчитывать и собирать цепи переменного тока с параллельным соединением катушек индуктивности.

Необходимое оборудование:

Персональный компьютер с установленной обучающей программой Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы:

1. Для схемы на рисунке рассчитать действующие значения токов (I , I_1 , I_2), активную (P , P_1 , P_2), реактивную (Q , Q_1 , Q_2) и полную (S , S_1 , S_2) мощности, углы фазовых отставаний токов от напряжения (φ , φ_1 , φ_2) во всех ветвях цепи, согласно данных своего варианта в таблице №1.

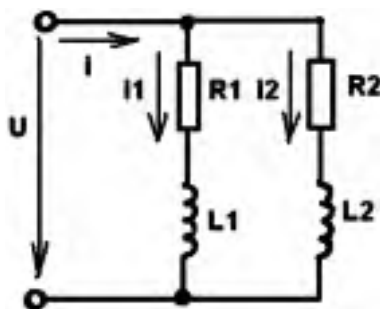


Таблица №1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R1; Ом	100	100	100	100	100	10	200	400	600	900	100	100	100	100	100
L1; Гн	0,8	0,6	0,4	0,2	0,05	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
L2; Гн	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,4	1,8	2,5	0,6	0,2

Для всех вариантов $R_2=200$ Ом; $U=220$ В; $f=50$ Гц

Методика расчёта.

Найдём угловую частоту:

$$\omega=2\pi f; \text{ рад./сек.}$$

Индуктивные сопротивления:

$$X_{L1}=\omega \cdot L_1; \quad X_{L2}=\omega \cdot L_2; \quad \text{Ом.}$$

Полные сопротивления ветвей:

$$Z_1=\sqrt{(R_1^2+X_{L1}^2)}; \quad Z_2=\sqrt{(R_2^2+X_{L2}^2)}; \quad \text{Ом.}$$

Действующие значения токов в ветвях:

$$I_1=U/Z_1; \quad I_2=U/Z_2; \quad \text{А.}$$

Углы фазовых отставаний тока от напряжения в ветвях:

$$\varphi_1= \arctg (X_{L1}/Z_1); \quad \varphi_2= \arctg (X_{L2}/Z_2).$$

Действующий ток в неразветвлённой части цепи:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}; \quad A.$$

Угол фазового отставания тока от напряжения в неразветвлённой части цепи:

$$\varphi = \arctg \left((I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2) / (I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2) \right).$$

Активные мощности:

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1; \quad P_2 = UI_2 \cos \varphi_2; \quad P = UI \cos \varphi; \quad B_T$$

Реактивная мощность:

$$Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1; \quad Q_2 = UI_2 \sin \varphi_2; \quad Q = UI \sin \varphi; \quad B_{Ap}$$

Полные мощности:

$$S_1 = UI_1; \quad S_2 = UI_2; \quad S = UI; \quad B_A$$

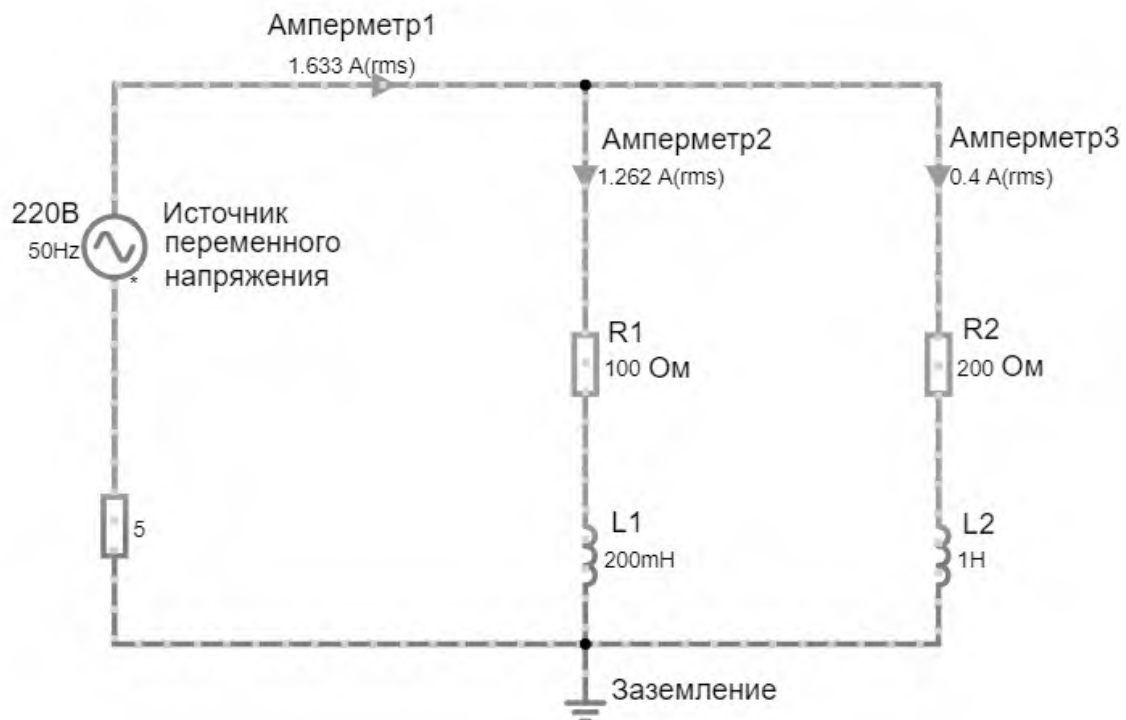
2. Результаты расчётов занести в таблицу №2.

Таблица №2

I1; A	I2; A	I; A	φ_1 ; град.	φ_2 ; град.	φ ; град.	P1; Вт	P2; Вт	P; Вт	Q1; ВА р	Q2; ВАр	Q; ВАр	S1; ВА	S2; ВА	S; ВА

3. Загрузить программу Circuit Simulator.

4. Собрать виртуальную схему согласно рисунка:



3. Выставить параметры элементов согласно своего варианта.

4. Для измерения переменных токов используются мультиметры (для измерения тока I используется амперметр 1, для I1 – амперметр 2, для амперметр 3).

5. С помощью амперметров измерить токи в цепях.

6. Результаты вычислений и измерений занести в таблицу №3.

Таблица №3

12. Лабораторная работа № 12 «Проверка свойств резонанса напряжений».

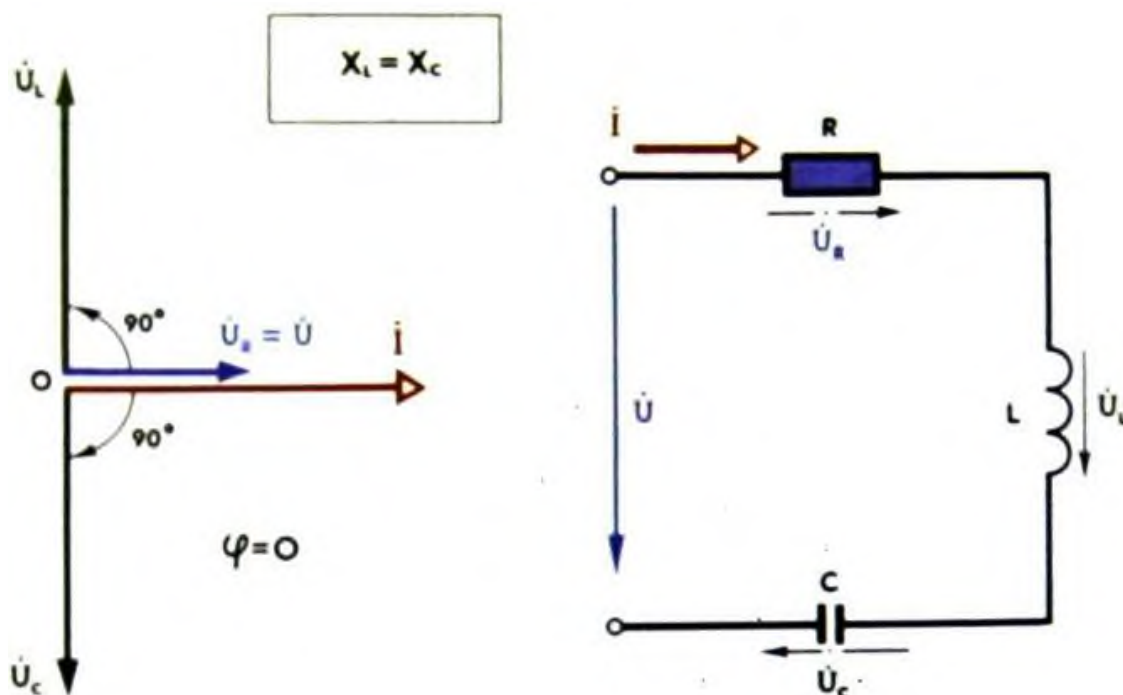
Цель работы

Опытным путём установить резонанс напряжений и проверить его основные свойства.

Краткие теоретические сведения.

Резонанс напряжений.

Резонанс напряжений возникает в последовательной R, L, C цепи.



По критериям резонанса реактивная составляющая входного сопротивления равна 0.

$$X = X_L - X_C = \omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0, \text{ т. е.}$$

$$X_L = X_C \text{ или } \omega_0 L = 1/\omega_0 C$$

Поэтому, частота, с которой наступает резонанс (**угловая резонансная частота**)

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

Так, как частота $f = \omega / 2\pi$, то **резонансная частота**

$$f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$$

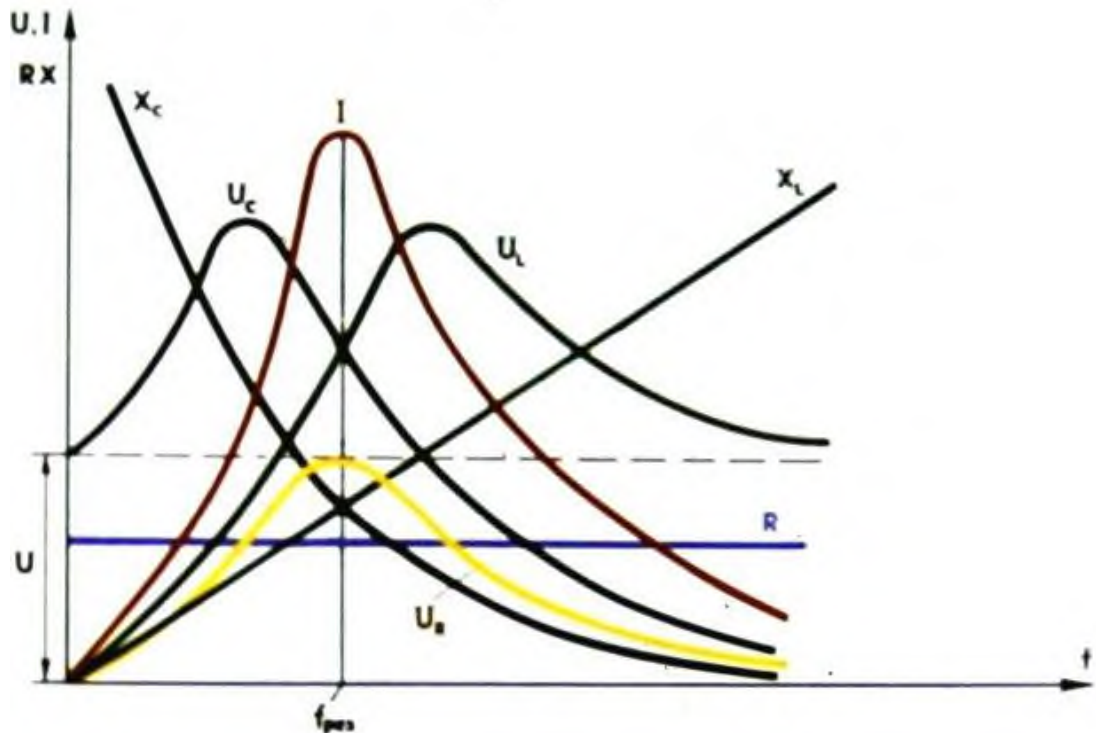
При резонансе сопротивление

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = \rho$$

и называется **характеристическим сопротивлением** последовательного контура.

Действующее значение напряжений на ёмкости и индуктивности получаются одинаковыми (поэтому назвали **резонанс напряжений**).

$$U_L = U_C$$



Добротность контура

$$q = U_L/U = U_C/U = \rho/R = \omega_0 L/R = 1/\omega_0 CR$$

Активная мощность

$$P = U_A I = R I^2$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = 0, \text{ так как } \varphi = 0$$

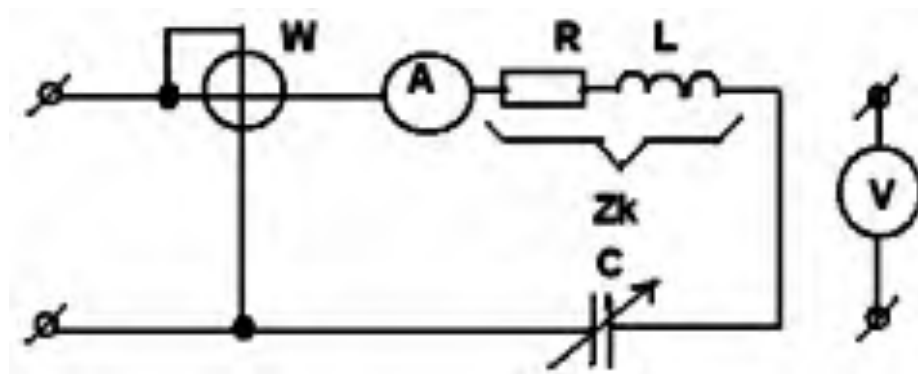
Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд;
- магазин емкостей C;
- катушка индуктивности Zk;
- ваттметр W;
- амперметр A ;

- вольтметр V;
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме

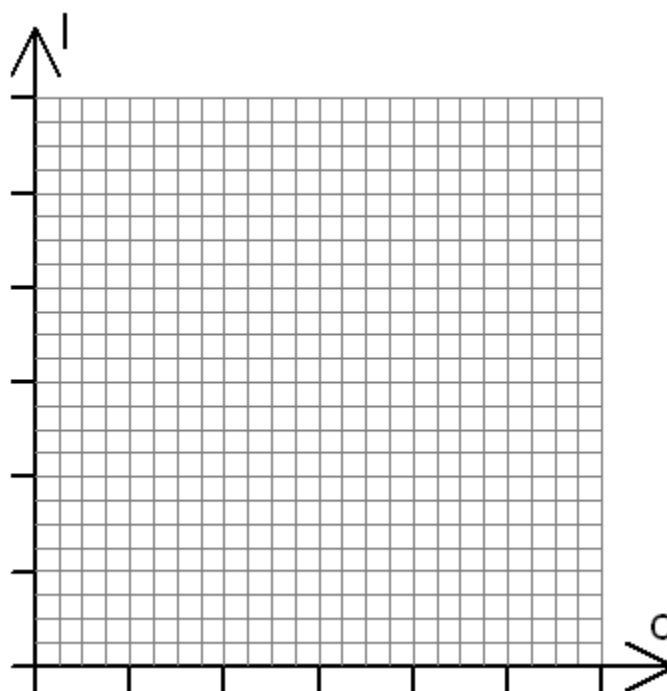


2. После проверки схемы преподавателем, включить заданное напряжение (не более 25 В). Изменяя ёмкость C, найти резонанс напряжений, при этом ток в цепи достигает максимального значения. Результаты измерений занести в таблицу.
3. Снять по 2 показания при ёмкости меньше резонансной и при ёмкости больше резонансной. Результаты измерений занести в таблицу №1.

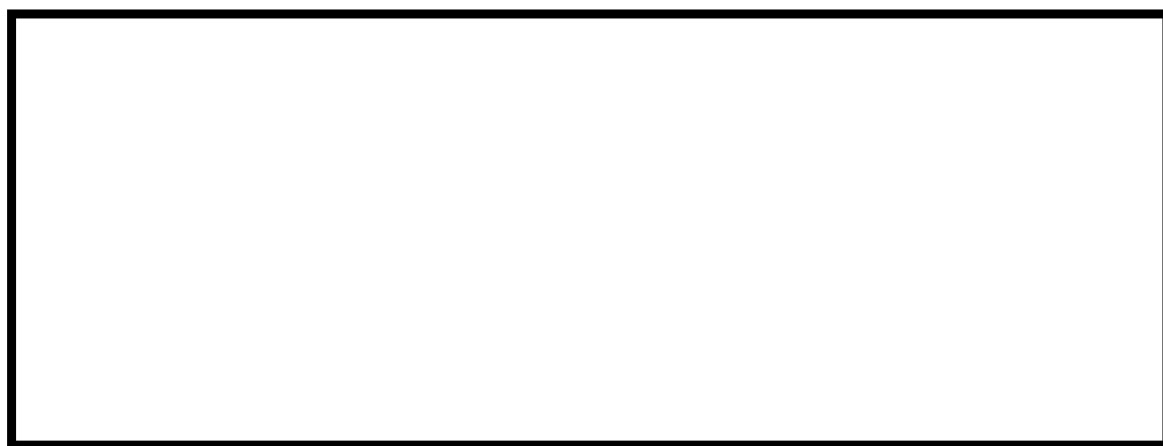
Таблица №1

Показания приборов						Результаты расчётов									Примечание
U	U _k	U _c	I	P	C	R	X _L	X _C	Z	U _L	U _R	cosφ	Q	S	
В	В	В	А	Вт	мкФ	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В		ВА р	ВА	
															C < C _p
															C = C _p
															C > C _p

4. Произвести необходимые вычисления. Формулы для расчёта: $R = P/I^2$; $Z = U/I$; $U_R = R \cdot I$; $U_L = \sqrt{(U_k^2 - U_R^2)}$; $X_L = U_L/I$; $X_C = U_C/I$; $\cos \varphi = R/Z$; $Q = \sqrt{(S^2 - P^2)}$; $S = U \cdot I$. Результаты расчётов занести в таблицу №1.
5. Построить график зависимости $I = f(C)$.



6. Построить векторные диаграммы. Построение векторной диаграммы начинается с выбора направления вектора тока (обычно по оси ОХ). Векторная диаграмма напряжения должна быть построена в масштабе по напряжению (например $10 \text{ В} = 1 \text{ См}$), с учётом того, что активное напряжение совпадает по фазе с током, индуктивное опережает на угол 90° , а ёмкостное - отстаёт от тока на угол 90° . Угол опережения откладывается от вектора тока против часовой стрелки, а угол отставания по часовой стрелке. Необходимо построить векторные диаграммы для первого, третьего и последнего опытов (3 диаграммы).



7. Сделать выводы по работе. В выводе должно быть подробно объяснено, как ведёт себя ток (увеличивается или уменьшается) в зависимости от изменения ёмкости. Должно быть определено, в каком опыте произошёл резонанс напряжений.

Контрольные вопросы.

1. Напишите формулу резонансной частоты.

2. Какое сопротивление называется характеристическим ?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

13. Лабораторная работа № 13 «Проверка свойств резонанса ТОКОВ».

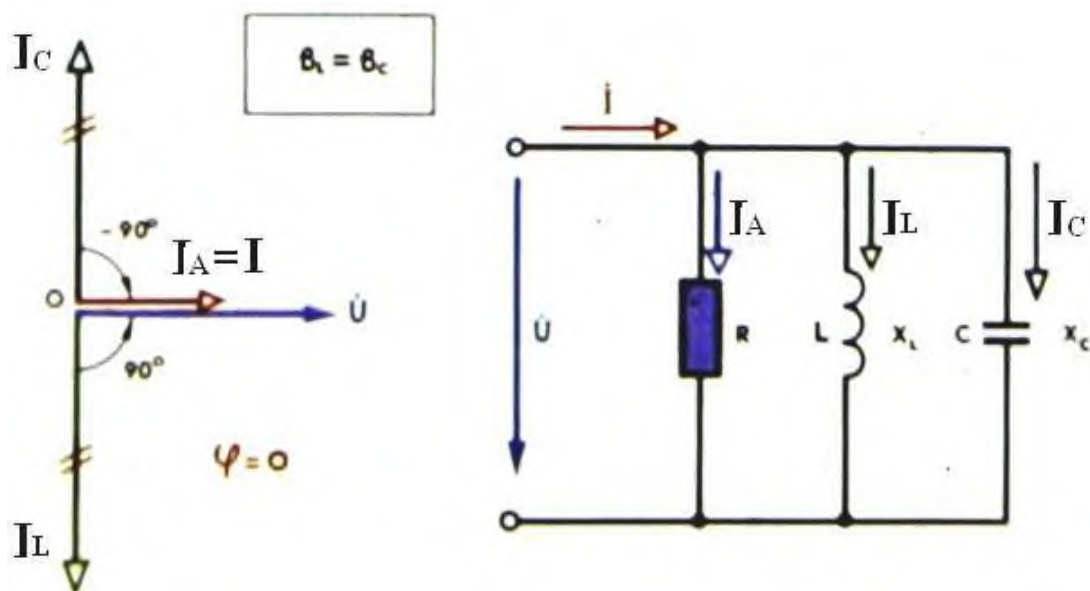
Цель работы:

Опытным путём убедиться в свойствах резонанса тока.

Краткие теоретические сведения.

Резонанс токов.

Резонанс токов возникает в цепи, содержащей, параллельно включенные емкость и индуктивность.



По критериям резонанса реактивная составляющая входной проводимости равна 0.

$$b = b_L - b_C = 1/\omega_0 L - \omega_0 C = 0, \text{ т. е.} \\ b_L = b_C \text{ или } 1/\omega_0 L = \omega_0 C$$

Угловая резонансная частота

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

Резонансная частота

$$f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$$

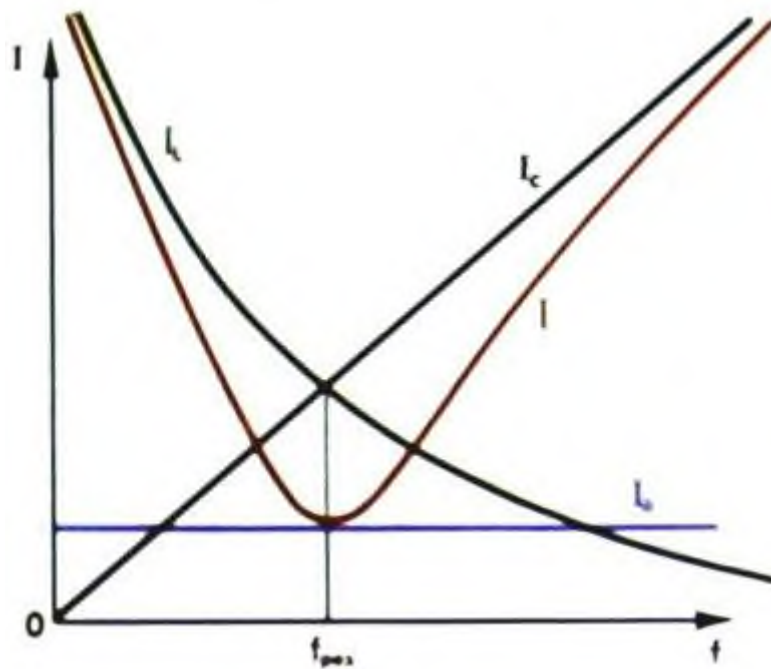
Проводимостм

$$\omega_0 C = 1/\omega_0 L = \sqrt{C / L} = \beta$$

называется **характеристической проводимостью** параллельного контура.

Действующее значение токов через ёмкость и индуктивность получаются одинаковыми (поэтому назвали **резонанс токов**).

$$I_L = I_C$$



Активная мощность

$$P = UI_A = U^2/R$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = 0, \text{ так как } \varphi = 0$$

Необходимое оборудование:

Персональный компьютер с установленной обучающей программой Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы:

1. Для схемы на рисунке рассчитать все токи (I , I_1 , I_2 , I_3) и резонансную частоту (f_0), согласно данным своего варианта в таблице №1.

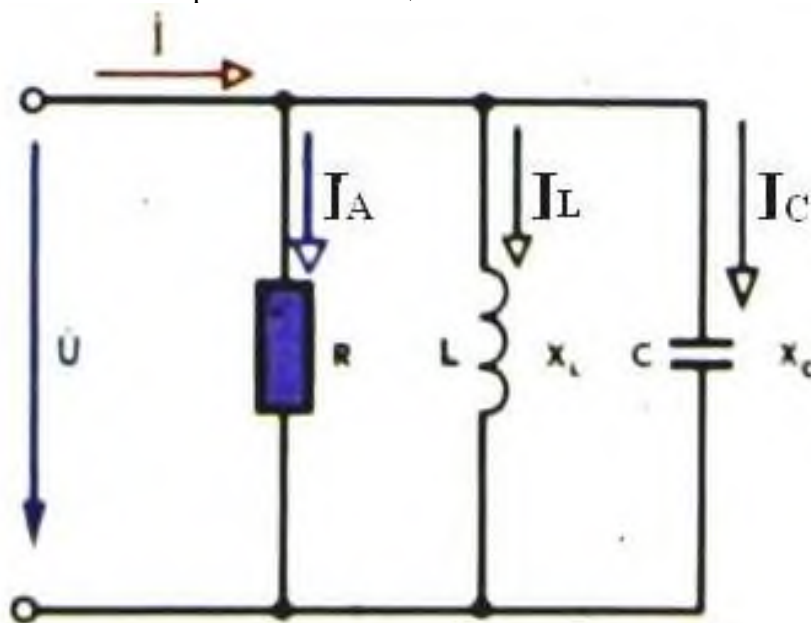


Таблица №1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L; мГн	20	25	30	40	60	100	180	300	600	100	100	100	100	100	100
C; мкФ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	1	5	20	30	40	50

Для всех вариантов $U = 100$ В, $R = 100$ Ом.

Методика расчёта.

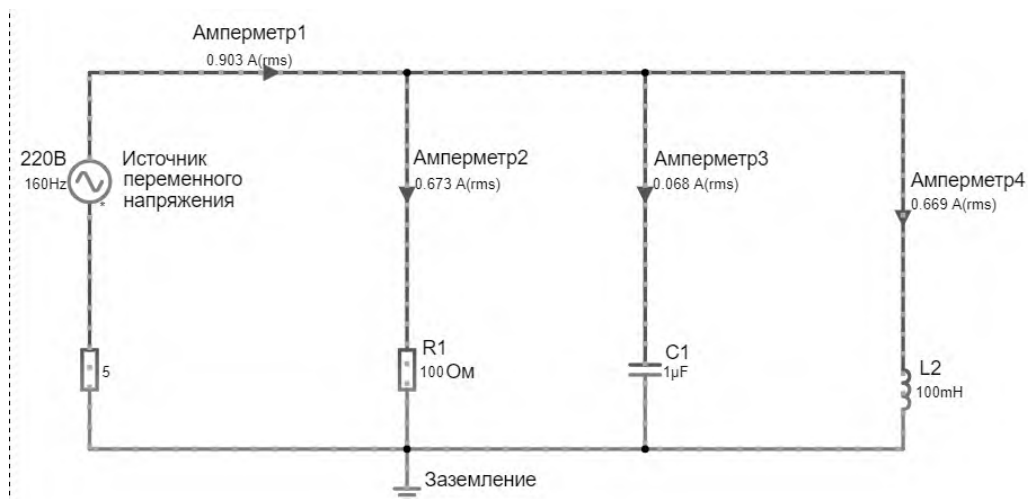
Токи в ветвях.

$$I_A = U / R; \quad I_L = U / (2\pi f \cdot L); \quad I_C = U \cdot 2\pi f \cdot C; \quad I = \sqrt{I_A^2 + (I_L - I_C)^2}; \quad A$$

Резонансная частота.

$$f_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$$

1. Загрузить программу Circuit Simulator.
2. Собрать виртуальную схему согласно рисунка:



3. Выставить параметры согласно своего варианта (f_0 согласно рассчитанной величины).
4. С помощью амперметров измерить токи в цепях.
5. Результаты вычислений и измерений занести в таблицу №2.

Таблица №2

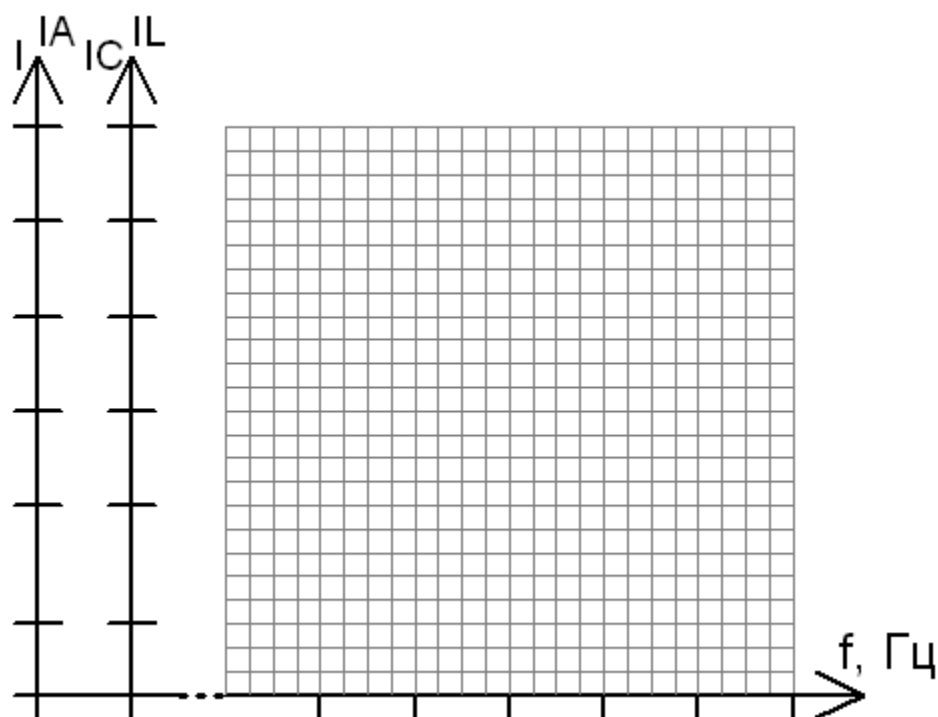
Ток	Расчётное значение	Измеренное значение
I ; А		
I_A ; А		
I_C ; А		
I_L ; А		

6. Изменяя частоту согласно таблицы №3, измерить токи во всех ветвях. Результаты занести в таблицу №3.

Таблица №3

$f\%$	$f = f\% \cdot f_0 / 100$	I	I_A	I_C	I_L
%	Гц	А	А	А	А
300					
150					
100					
60					
20					

7. Построить графики функций $I = f(f)$, $I_A = f(f)$, $I_C = f(f)$, $I_L = f(f)$ на одной координатной плоскости.



8. Сделать вывод о свойствах резонанса токов.

Контрольные вопросы.

1. В какой цепи возникает резонанс токов ?

2. Какая проводимость называется характеристической ?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

14. Лабораторная работа № 14 «Исследование трёхфазной цепи при включении потребителей звездой».

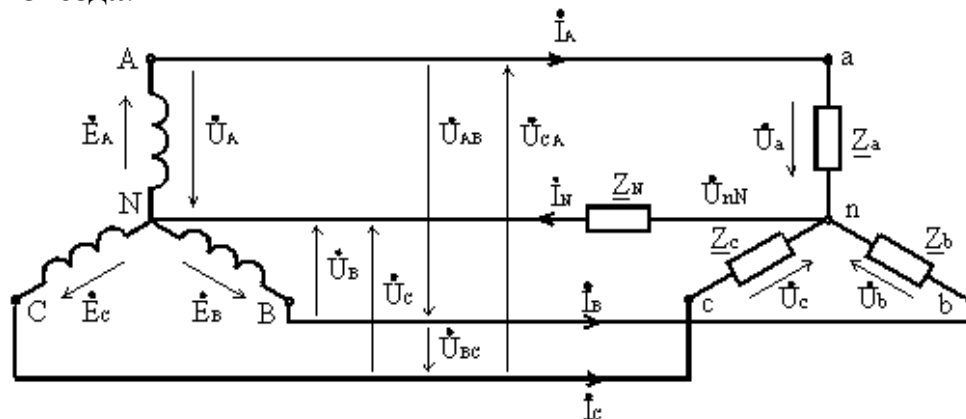
Цель работы

Проверить основные соотношения в цепи трёхфазного тока при включении потребителей звездой.

Краткие теоретические сведения.

Соединение фаз генератора и приемника звездой.

При соединении фаз обмотки генератора звездой их концы X, Y и Z соединяют в одну общую точку N, называемую **нейтральной точкой (или нейтралью)**. Концы фаз приемников (Z_a , Z_b , Z_c) также соединяют в одну точку n. Такое соединение называется **соединение звезда**.



Провода A–a, B–b и C–c, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются **линейными**, провод N–n, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, – **нейтральным**.

Фазное напряжение U_F – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью (U_A , U_B , U_C у источника; U_a , U_b , U_c у приемника). Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ($U_A=U_a$, $U_B=U_b$, $U_C=U_c$). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

Линейное напряжение (U_L) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу.

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

Фазные (I_F) – это токи в фазах генератора и приемников.

Линейные (I_L) – токи в линейных проводах.

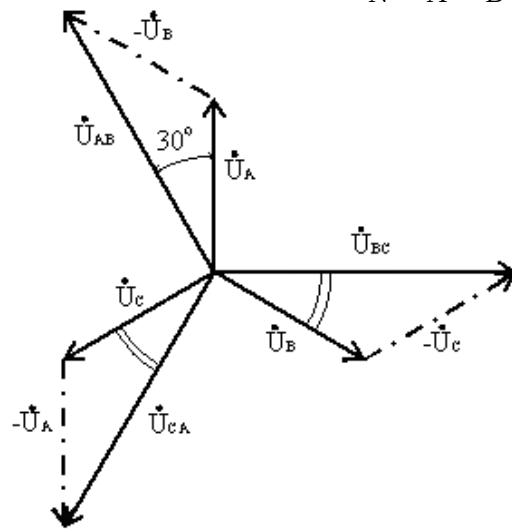
При соединении в звезду фазные и линейные токи равны

$$I_F = I_L.$$

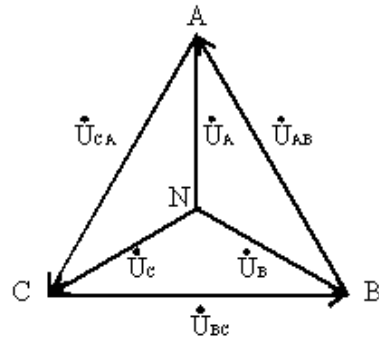
Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают I_N .

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n (N) имеем в комплексной форме

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$



а)



б)

В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений запишем уравнения по второму закону Кирхгофа.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Из векторной диаграммы видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° (общее обозначение U_L), и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений U_A, U_B, U_C , (U_Φ) на угол 30° .

Действующие значения линейных напряжений:

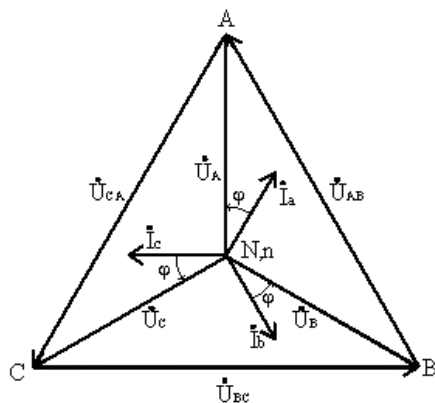
$$U_L = 2U_\Phi \cos 30^\circ \text{ или } U_L = \sqrt{3} U_\Phi$$

Симметричная нагрузка приемника при соединении звездой.

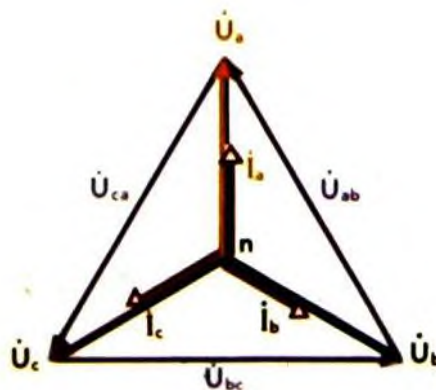
При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $Z_a = Z_b = Z_c$, т.е. когда $R_a = R_b = R_c = R_\Phi$ и $X_a = X_b = X_c = X_\Phi$, фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_a = I_b = I_c = I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi,$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \arctg (X_\Phi / R_\Phi).$$



$$\varphi \neq 0$$



$$\varphi = 0 \text{ (симметричная активная нагрузка)}$$

Геометрическая сумма трех векторов тока равна нулю: $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$. Следовательно, в случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе $I_N = 0$, поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

Несимметричная нагрузка приемника при соединении звездой.

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ и $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / Z_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / Z_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / Z_c.$$

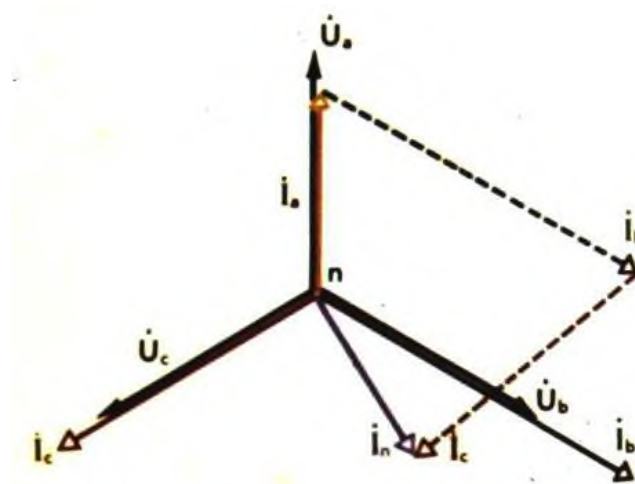
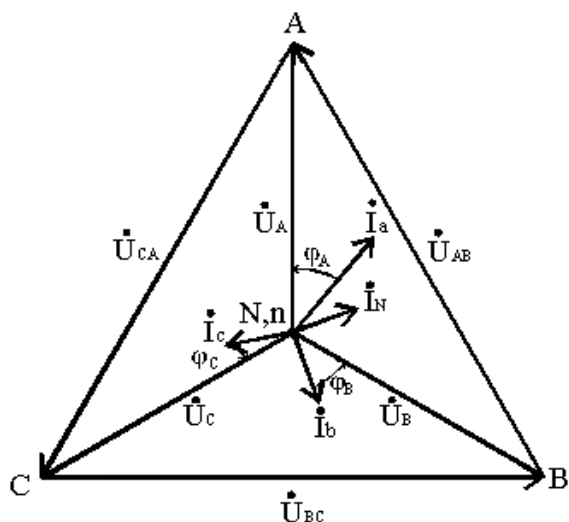
Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N$ равен геометрической сумме фазных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

Напряжения будут $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$, $U_\phi = U_L / \sqrt{3}$, благодаря нейтральному проводу при $Z_N = 0$.

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

В четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки, например, электрические лампы накаливания. Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.



При активной нагрузке

Нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;
- подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети.

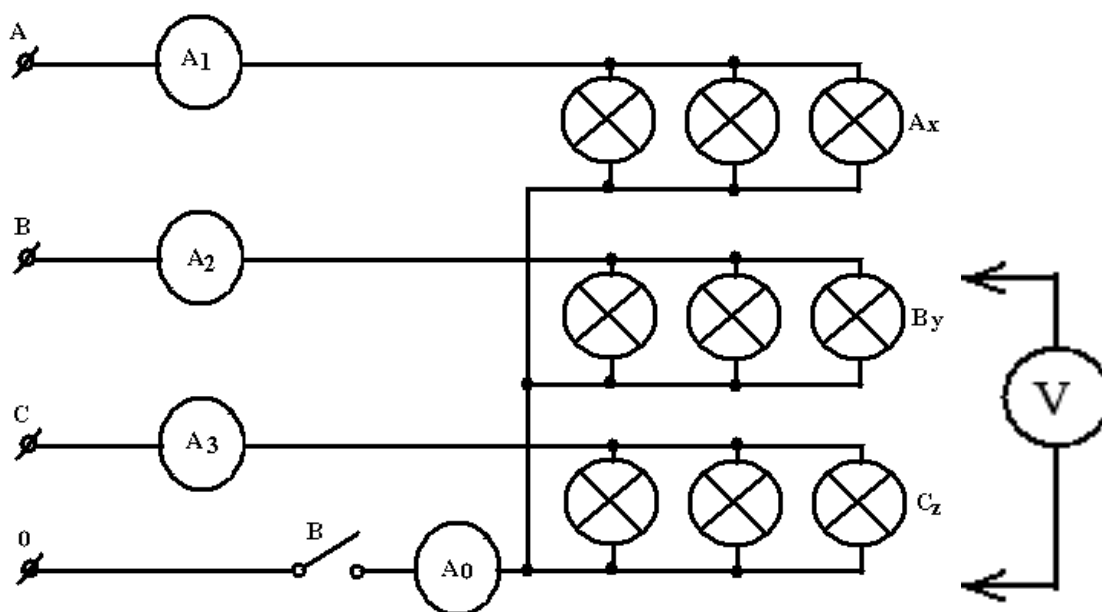
В цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд;
- ламповые реостаты A_x, B_y, C_z ;
- амперметры A_1, A_2, A_3, A_0 ;
- вольтметр V ;
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме



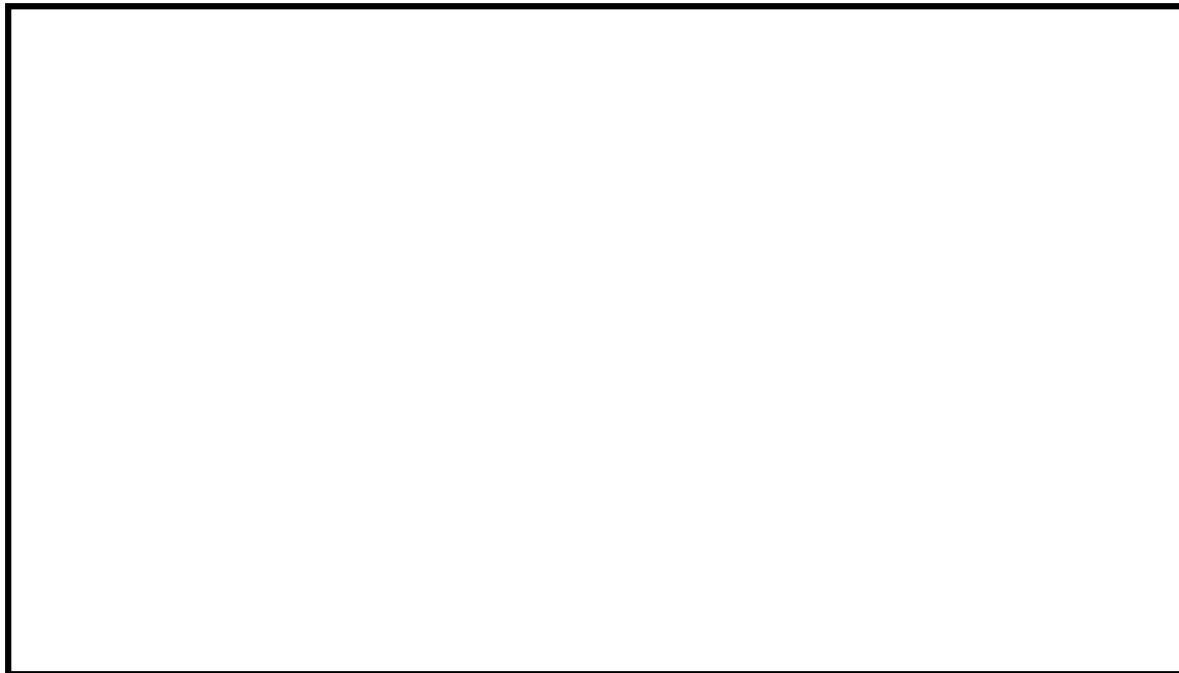
2. После проверки схемы преподавателем включить равномерную нагрузку фаз, включить нулевой провод выключателем В и измерить фазные и линейные напряжения и токи. Результаты измерений занести в таблицу №1.

Таблица №1

I_A	I_B	I_C	I_0	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	Примечание
A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	
										Равномерная нагрузка без нулевого провода
										Равномерная нагрузка с нулевым проводом
										Неравномерная нагрузка без нулевого провода
										Неравномерная нагрузка с нулевым проводом

3. Отключить нулевой провод выключателем В при равномерной нагрузке фаз и измерить фазные и линейные токи. Результаты измерений занести в таблицу №1.

4. На ламповых реостатах создать неравномерную нагрузку и измерить фазные и линейные токи и напряжения с включенным и отключенным нулевым проводом. Результаты измерений занести в таблицу №1.
5. Построить векторные диаграммы для всех опытов (4 диаграммы).



6. Сделать вывод о назначении нулевого провода при соединении нагрузки звездой.

Контрольные вопросы.

1. Какие напряжения называются фазным и линейным ?

2. Почему нельзя ставить предохранитель в цепь нулевого провода?

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

15. Лабораторная работа № 15 «Исследование трёхфазной цепи при включении потребителей треугольником».

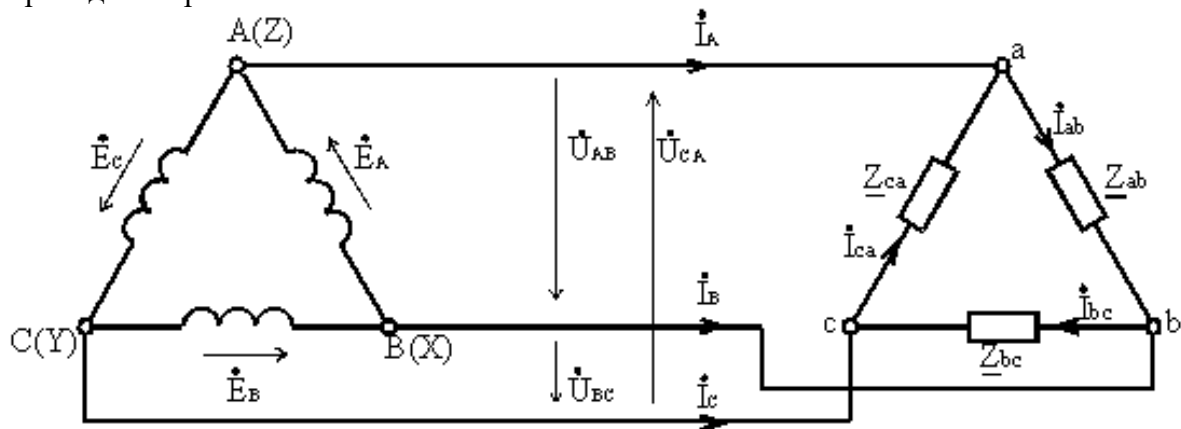
Цель работы

Проверить основные соотношения в цепи трёхфазного тока при включении потребителей треугольником.

Краткие теоретические сведения.

Соединение фаз генератора и приемника треугольником.

При соединении источника питания треугольником конец X одной фазы соединяется с началом B второй фазы, конец Y второй фазы – с началом C третьей фазы, конец третьей фазы Z – с началом первой фазы A. Начала A, B и C фаз подключаются с помощью трех проводов к приемникам.



Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания, и поэтому недопустим.

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.

$$U_L = U_\Phi.$$

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания: $U_{ab} = U_{AB}$, $U_{bc} = U_{BC}$, $U_{ca} = U_{CA}$. По фазам Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} приемника протекают фазные токи $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$ и $\dot{I}_{ca}$. Условное

положительное направление фазных напряжений $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_{bc}$ и $\dot{U}_{ca}$ совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ принято от источников питания к приемнику.

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником **фазные токи не равны линейным**. Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи можно определить по фазным

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

Сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0,$$

Симметричная нагрузка.

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}e^{j\varphi}$$

$$\text{т.е. } Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z, \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi.$$

Так как линейные (они же фазные) напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

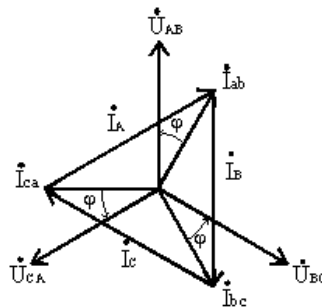
$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120° .

Линейные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc};$$

образуют также симметричную систему токов.

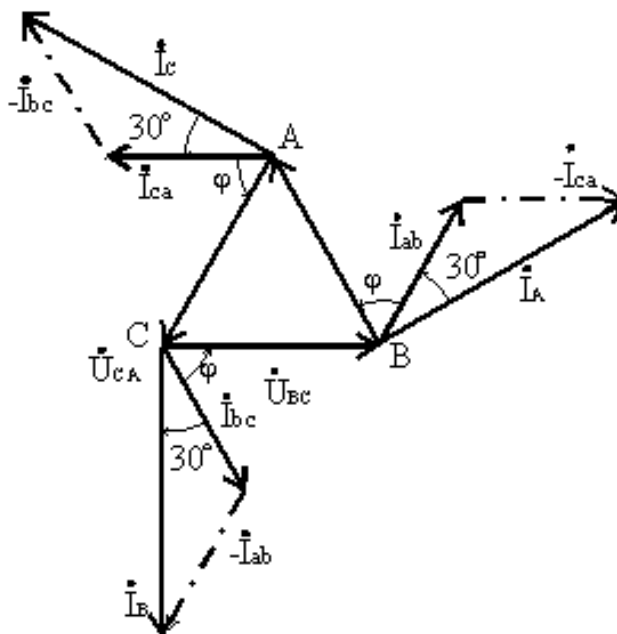


На векторной диаграмме фазные токи отстают от фазных напряжений на угол φ (полагаем, что фазы приемника являются индуктивными, т.е. $\varphi > 0^\circ$). Здесь принято, что напряжение U_{AB} имеет нулевую фазу. Из диаграммы следует, что любой линейный ток

больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток $\dot{I}_A$ отстает по фазе от фазного тока $\dot{I}_{ab}$ на угол 30° , на этот же угол отстает $\dot{I}_B$ от $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_C$ от $\dot{I}_{ca}$.

При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

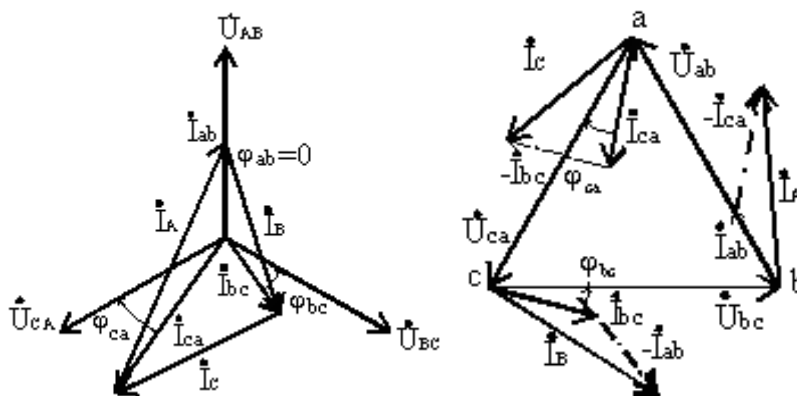
Фазное напряжение $U_\Phi = U_L$. Фазный ток $I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi$, линейный ток $I_L = I_\Phi$, угол сдвига по фазе $\varphi = \text{arctg}(X_\Phi / R_\Phi)$.



Несимметричная нагрузка приемника.

В общем случае при несимметричной нагрузке $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Обычно она возникает при питании от трехфазной сети однофазных приемников.

Ниже приведены векторная и топографическая диаграммы для случая, когда в фазе ab имеется активная нагрузка, в фазе bc – активно-индуктивная, а в фазе ca – активно-емкостная.



Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что **при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным**, так как линейные напряжения генератора являются

постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой. Поэтому **схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки.**

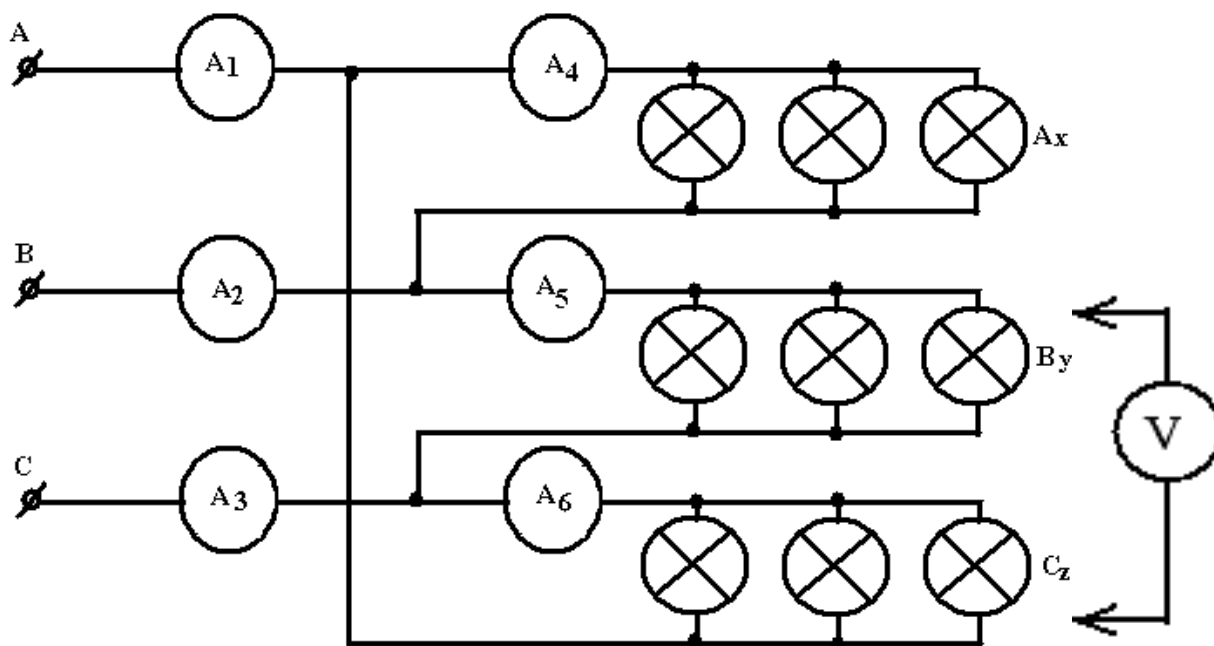
При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$ и соответствующие им сдвиги фаз φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} . Затем определяют линейные токи в комплексной форме.

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд;
- ламповые реостаты A_x , B_y , C_z ;
- амперметры A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 , A_6 ;
- вольтметр V ;
- соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме

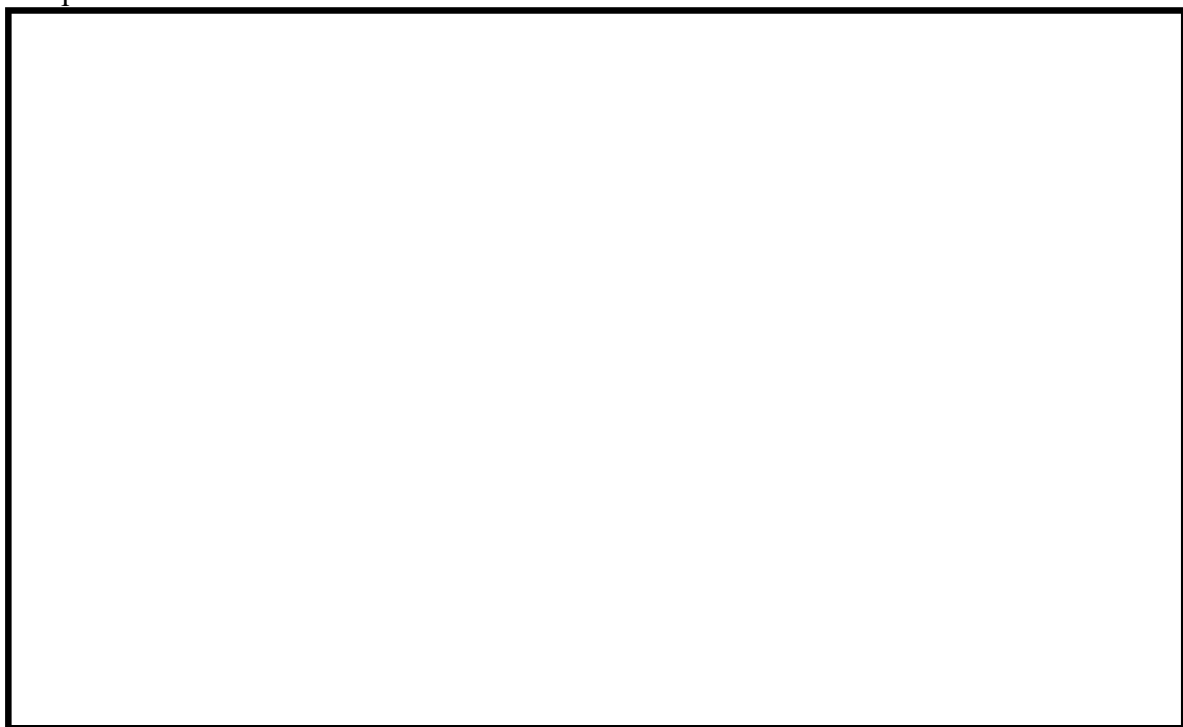


2. После проверки схемы преподавателем включить равномерную нагрузку фаз и измерить фазные и линейные напряжения и токи. Результаты измерений занести в таблицу №1.

Таблица №1

I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	Примечание
A	A	A	A	A	A	B	B	B	
									Равномерная нагрузка фаз
									Равномерная нагрузка, оборвана линия
									Неравномерная нагрузка фаз

3. Отключить одну фазу при равномерной нагрузке фаз и измерить фазные и линейные токи и напряжения. Результаты измерений занести в таблицу №1.
4. Подключить все фазы. На ламповых реостатах создать неравномерную нагрузку и измерить фазные и линейные токи и напряжения. Результаты измерений занести в таблицу №1.
5. Построить векторные диаграммы для 1 и 3 опытов (2 диаграммы). Векторные диаграммы напряжений и токов должны быть построены в масштабе по току (например $0,1\text{ A} = 1\text{ см}$) и напряжению (например $50\text{ В} = 1\text{ см}$). Начинаем с построения векторов фазных напряжений, которые выходят из одной точки и сдвинуты в пространстве на угол 120° . Далее строим векторы фазных токов, совпадающих по фазе с фазными напряжениями, так как нагрузка имеет активный характер. Векторы линейных токов представляют собой разности двух фазных токов. При этом вектор разности получается, если концы двух выходящих из одной точки векторов (фазные токи) соединяются вектором (линейный ток) и стрелка ставится к вектору, из которого вычитают.



6. Сделать вывод по работе. В выводе необходимо проверить выполнение основных соотношений для фазных и линейных токов и напряжений при соединении нагрузки треугольником по результатам замеров первого опыта. Объяснить, что произошло со схемой, когда оборвали (отключили) один из линейных проводов, и по какой причине изменились линейные токи в третьем опыте.

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

16. Лабораторная работа №17 «Ознакомление с правилами эксплуатации амперметра, вольтметра, ваттметра»

Цель: Изучить правила эксплуатации простейших электроизмерительных приборов.

Оборудование и приборы: Амперметр постоянного тока, вольтметр постоянного тока, ваттметр постоянного тока, резисторы, выключатели, предохранители различных типов, соединительные провода.

Для проведения различных измерений в электрических цепях применяются электроизмерительные приборы, которые по роду измеряемой величины делятся на амперметры, вольтметры, ваттметры, частотометры, фазометры, омметры, счетчики энергии и др. На шкале прибора пишут полное его наименование или начальную латинскую букву единицы измеряемой величины, например: А – амперметр, V- вольтметр, W – ваттметр и др.

По принципу действия измерительного механизма приборы делятся на системы. В лаборатории электротехники наиболее широкое применение находят приборы магнито-электрической, электромагнитной, электродинамической и индукционной систем. Условное обозначение этих систем на шкалах приборов показано в таблице №1.

Важнейшей характеристикой любого измерительного прибора является его точность. По степени точности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4.

Число классов точности указывает основную допустимую приведенную погрешность прибора, т.е. выраженное в процентах отношение наибольшей допустимой абсолютной погрешности прибора, находящегося в нормальных условиях работы, к номинальной величине прибора. На шкале электроизмерительного прибора кроме условного наименования, системы и класса точности указываются род тока, рабочее положение шкалы прибора, величина испытательного напряжения, знак завода – изготовления, год выпуска, заводской номер прибора. Основные знаки на шкалах приборов приведенные в таблице №1.

Амперметр включается в цепь последовательно с приемником и имеет очень мало сопротивление. Благодаря этому на амперметре практически не возникает потери напряжения и мощности. ЭДС и напряжение источника электрической энергии измеряются вольтметром, зажимы которого присоединяются с тем точкам цепи, между которыми следует определить напряжения.

Для уменьшения потерь мощности и тока, протекающего через вольтметр, его внутреннее сопротивление делают очень большим (несколько тысяч ом).

При включении амперметра и вольтметра в цепь постоянного тока следует соблюдать правило полярности: положительный зажим прибора должен подключаться к положительному полюсу источника, отрицательный зажим прибора - к отрицательному полюсу источника.

Знак системы	Система	Знаки на шкалах приборов	Пояснения
	Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой	0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4.	Классы точности прибора
	Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом	Род тока: Установка прибора 	Постоянный ток Переменный ток Постоянный переменный ток Трехфазный ток Вертикальное положение шкалы Горизонтальное положение шкалы Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ Генераторный зажим Зажим, соединенный с корпусом
	Электромагнитная		
	Электродинамическая		
	Ферродинамическая		
	Индукционная		

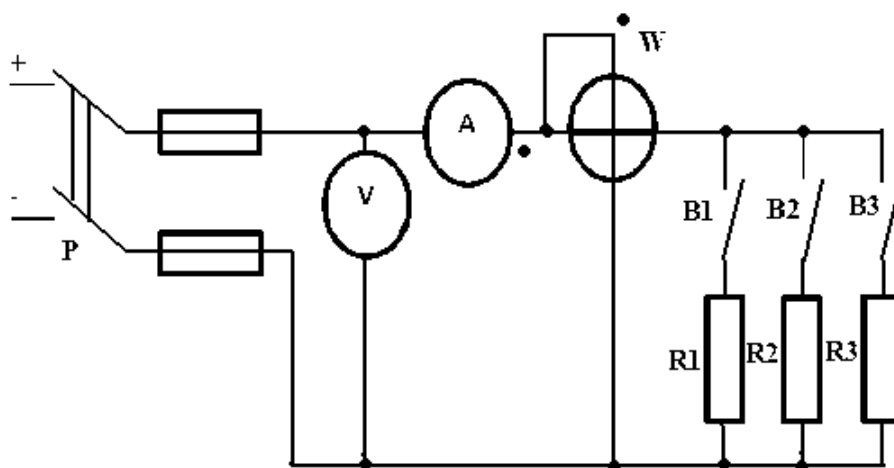


Рисунок 1.

Измерение мощности производится обычно при помощи ваттметра. Ваттметр имеет две обмотки: такую в очень малом сопротивлении, которая включается в цепь

последовательно, и обмотку напряжения большого сопротивления, которая включается в цепь параллельно.

На электрической схеме (рисунок 1) ваттметр изображен кружком с двумя перпендикулярными линиями внутри круга. Горизонтальная линия изображает токовую обмотку и вертикальная – обмотку напряжения. Входные зажимы обмоток (генераторные зажимы) обозначаются точками (на приборе – звездочками).

Шкала электроизмерительных приборов часто бывает разделена на α_H делений без указания значения этих делений в измеряемых единицах (В, А, Вт). В этом случае перед началом измерения необходимо определить цену деления шкалы прибора.

Ценой деления шкалы прибора называется число электрических единиц (вольт, ампер, ватт и др.), приходящихся на одно деление шкалы прибора.

Цена деления:

$$\text{Вольтметра } C_U = \frac{U_H}{\alpha_H} \left(\frac{В}{\text{дел}} \right)$$

$$\text{Амперметра } C_I = \frac{I_H}{\alpha_H} \left(\frac{А}{\text{дел}} \right)$$

$$\text{Ваттметра } C_P = \frac{U_H \cdot I_H}{\alpha_H} \left(\frac{ВТ}{\text{дел}} \right)$$

где, $U_H \cdot I_H$ – номинальные значения напряжения и тока приборов;

α_H – полное число делений шкалы прибора.

Если при измерений стрелка прибора отклонилась на α делений, то значение измеряемой величины будет:

$$\text{Для вольтметра } U = C_U \cdot \alpha \text{ (В)}$$

$$\text{Для амперметра } I = C_I \cdot \alpha \text{ (А)}$$

$$\text{Для ваттметра } P = C_P \cdot \alpha \text{ (ВТ)}$$

Пример 1.

Номинальное напряжения вольтметра $U_H = 150$ В. Шкала имеет $\alpha_H = 100$ делений. Определить измеренное напряжение, если стрелка прибора отклонилась на $\alpha_H = 80$ делений.

Решение:

$$\text{Цена деления равна } C_U = \frac{U_H}{\alpha_H} = \frac{150}{100} = 1,5 \frac{В}{\text{дел}}$$

$$\text{Измеренное напряжение: } U = C_U \cdot \alpha = 1,5 \cdot 80 = 120 \text{ В.}$$

Пример 2.

Номинальное напряжения ваттметра $U_H = 150$ В. Номинальный ток $I_H = 5$ А. Шкала имеет $\alpha_H = 75$ делений. Определить значение измеренной мощности, если стрелка ваттметра отклонилась на $\alpha_H = 50$ делений.

Решение:

$$\text{Цена деления шкалы ваттметра } C_P = \frac{U_H \cdot I_H}{\alpha_H} = \frac{150 \cdot 5}{75} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{дел}}$$

Измеренная мощность $P = 10 \cdot 50 = 500$ Вт.

При выполнении лабораторных работ, кроме электроизмерительных приборов, часто приходится пользоваться регулировочными и нагрузочными реостатами, резисторами, трансформаторами и прочей аппаратурой. Каждый такой аппарат характеризуется своими номинальными данными: напряжением, током, сопротивлением и т.д. При всех номинальных напряжениях, ток аппарата не должен превышать номинальных значений этих же величин, приведенных в его паспорте.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с устройством рубильника – Р, плавких предохранителей, резисторов – R_1, R_2 , выключателей – В1 – В3.
2. Собрать электрическую цепь по схеме (рисунок 1)
3. Определить цену деления шкалы амперметра, вольтметра и ваттметра.
4. После проверки схемы преподавателем включать рубильник.
Установить три различных значения тока, при которых снять показания приборов. Результаты показаний занести в таблицу №1.1.

Таблица 1.1.

№ опы- тов	Включены резис- торов	Показания вольтметра		Показания амперметра		Показания ваттметра	
		α , дел	U, В	α , дел	I, А	α , дел	P, Вт
1	R_1						
2	R_1 и R_2						
3	R_1, R_2, R_3						

Выключить рубильник:

Результаты измерений показать преподавателю; после его разрешения разобрать цепь и привести в порядок рабочее место.

Содержание отчета: схема включения приборов, расчеты по определению цены деления приборов, таблица с результатами измерений, краткая техническая характеристика применяемых измерительных приборов.

Контрольные вопросы:

1. Как определить мощность, в каких единицах измеряется мощность?

2. Каким приборам измеряется мощность?

3. Как определим цену деления шкалы ваттметра?

4. Как обозначается полное число деления шкалы прибора?

5. Как включается в цепь амперметр?

6. Как включается в цепь вольтметр?

7. Для чего служит реостат?

17. Лабораторная работа № 17 «Измерение сопротивления».

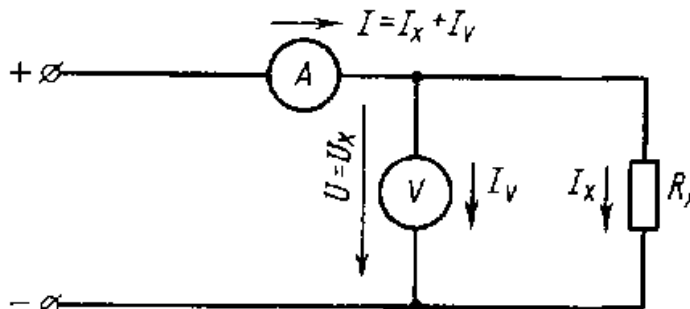
Цель работы:

Научиться измерять сопротивление различными способами.

Краткие теоретические сведения.

Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра.

Электрическое сопротивление можно определить с помощью амперметра и вольтметра, пользуясь законом Ома.

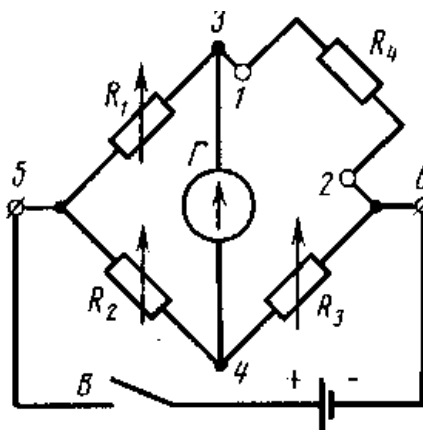


$$R_X = UR_V / (IR_V - U)$$

Если пренебречь R_V , то $R_X = U / I$

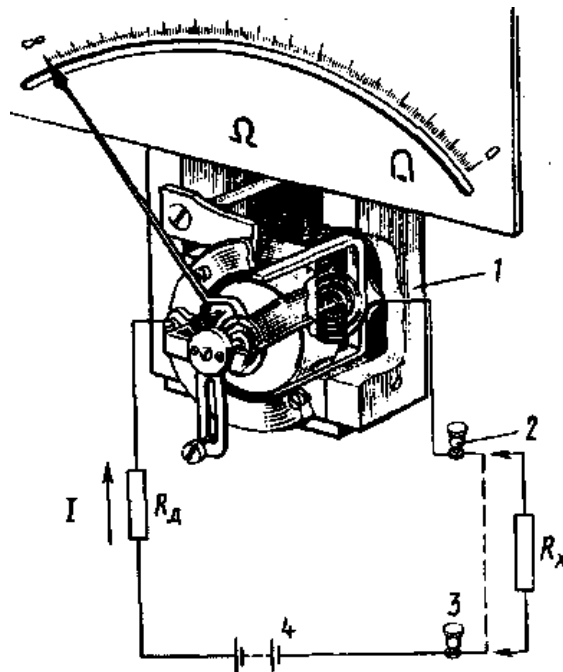
Измерение сопротивлений электрическими мостами.

Мостовая схема состоит из источника питания, чувствительного прибора и четырех резисторов, включаемых в плечи моста: с неизвестным сопротивлением R_X (R_4) и известными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , которые могут при измерениях изменяться. Прибор включают в одну из диагоналей моста (измерительную), а источник питания — в другую (питающую). Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 можно подобрать такими, что при замыкании контакта В показания прибора будут равны нулю (в таком случае принято говорить, что мост уравновешен).



$$R_X = (R_1/R_2)R_3$$

Измерение омметром.



Омметр представляет собой миллиамперметр 1 с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и включается последовательно с измеряемым сопротивлением R_x и добавочным резистором R_d в цепь постоянного тока. При неизменных э. д. с. источника и сопротивления резистора R_d ток в цепи зависит только от сопротивления R_x . Это позволяет отградуировать шкалу прибора непосредственно в Омах. Если выходные зажимы прибора 2 и 3 замкнуты накоротко (см. штриховую линию), то ток I в цепи максимален и стрелка прибора отклоняется вправо на наибольший угол; на шкале этому соответствует сопротивление, равное нулю. Если цепь прибора разомкнута, то $I = 0$ и стрелка находится в начале шкалы; этому положению соответствует сопротивление, равное бесконечности.

Необходимое оборудование:

Персональный компьютер с установленной обучающей программой Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы:

1. Загрузить программу Загрузить программу Circuit Simulator.
2. Собрать виртуальную схему для измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра.

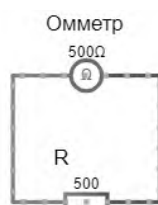


3. Изменяя сопротивление R согласно таблицы №1 замерить значения напряжения и тока. Результаты занести в таблицу №1.

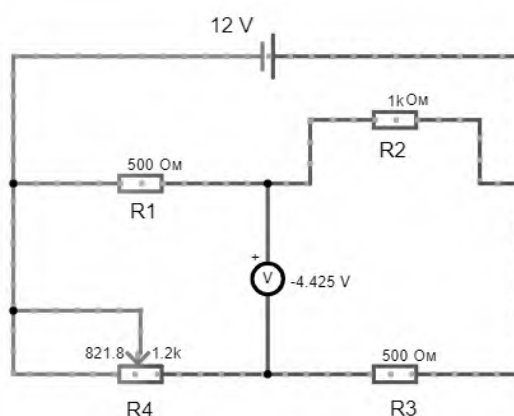
Таблица №1

Измеряемое сопротивлени е R	Измерение вольтметром и амперметром			Измерение мультиметром	Измерение мостом	
	I	U	$R=U/I$		$R_2\%$	$R=12500/R_2$ %
Ом	A	B	Ом	Ом	%	Ом
0,0001						
1						
250						
500						
750						
100 000						
1 000 000						

4. Собрать виртуальную схему для измерения сопротивления с помощью мультиметра.



5. Изменяя сопротивление R согласно таблицы №1 замерить значения сопротивления. Результаты занести в таблицу №1.
6. Собрать виртуальную схему для измерения сопротивления с помощью моста. Для переменного сопротивления R_2 установить шаг 1%.



7. Изменяя сопротивление R согласно таблицы №1 замерить значения сопротивления R_2 в % ($R_2\%$). Результаты занести в таблицу №1. Необходимо подобрать для каждого измеряемого R такой $R_2\%$ (двигая движок переменного резистора R_2), чтобы показания гальванометра G были равны нулю (или близкими к нулю).
8. Произвести расчёты, согласно таблицы №1. Результаты расчётов занести в таблицу №1.
9. Сделать вывод о достоинствах и недостатках различных схем измерения сопротивления.

Оценка _____ Преподаватель _____ (_____)

18. Лабораторное занятие № 18. В форме практической подготовки Включение в цепь и поверка однофазного счётчика электрической энергии.

Конструкция и принцип действия

Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии двух или нескольких переменных магнитных потоков с токами, индуцированными в подвижном проводнике (например, диске). Типичным представителем этой системы является классический индукционный счетчик-измеритель активной энергии.

Рассмотрим устройство и принцип действия индукционного однофазного счетчика активной энергии. На рис 1 показана упрощенная конструкция такого прибора. Основными элементами прибора являются два магнитопровода со своими обмотками (напряжения и токовой), вращающийся диск и счетный механизм.

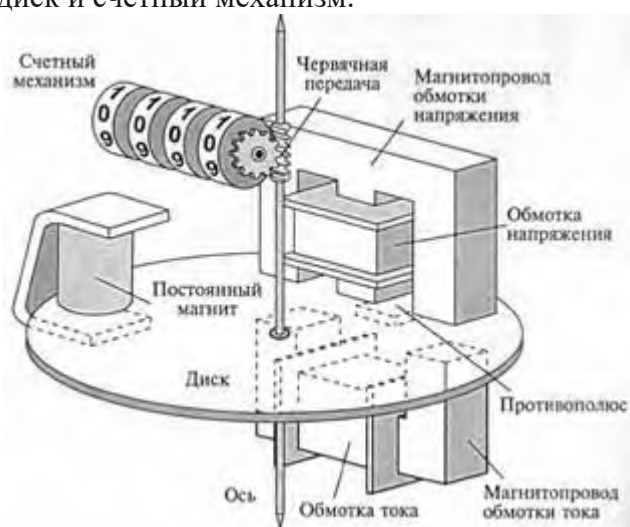


Рис. 1. Упрощенная конструкция индукционного однофазного счетчика

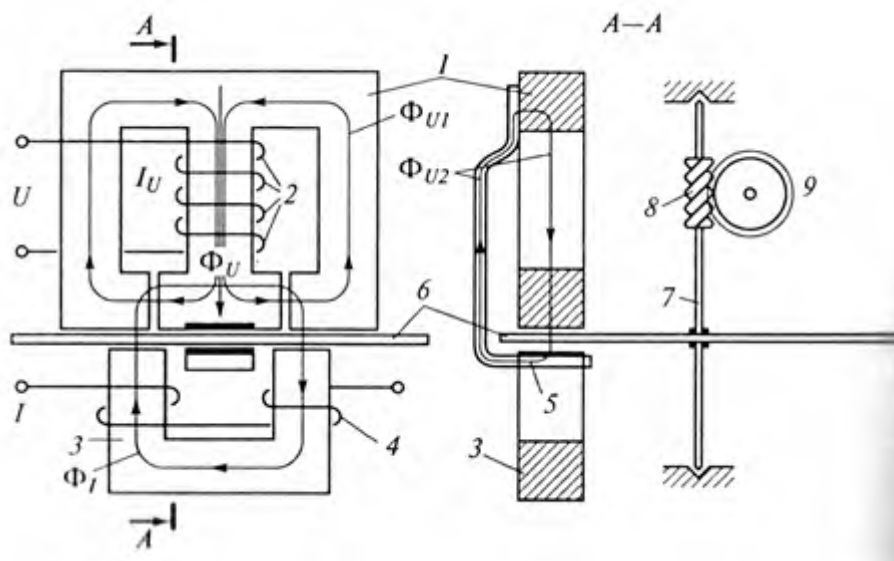


Рис. 2. Схема, поясняющая принцип действия счетчика:

1-магнитопровод обмотки напряжения; 2-обмотка напряжения; 3- магнитопровод обмотки тока; 4- обмотка тока; 5- противопололюс; 6- диск; 7- ось; 8- червячная передача; 9- счетный механизм.

Рассмотрим работу счетчика на примере входных сигналов напряжения и тока синусоидальной формы с действующими значениями, равными, соответственно, U и I . Входное напряжение U , приложенное к обмотке напряжения 2, создает в ней поток I_U имеющий по отношению к напряжению U сдвиг по фазе, близкий к 90° (из-за большого индуктивного сопротивления этой обмотки). Ток I_U рождает магнитный поток Φ_U в среднем сердечнике магнитопровода обмотки напряжения 1. Этот поток Φ_U делится на два потока: нерабочий поток Φ_{U1} , который замыкается внутри магнитопровода 1; и основной поток Φ_{U2} , пересекающий диск 6, закрепленный на оси 7 и вращающийся вместе с нею. Этот основной поток замыкается через противоположный полюс 5.

Входной ток I , текущий в обмотке тока создает в магнитопровode 3 магнитный поток Φ_I отстает от тока I на небольшой угол потерь α (поскольку сопротивление токовой обмотки мало).

Вращающий момент M в данной электромагнитной механической системе можно определить следующим образом:

$$M = kUI \sin Y$$

Где k - общий коэффициент пропорциональности; $\sin Y$ - фазовый сдвиг

Для получения результата определения потребленной активной энергии достаточно проинтегрировать значения текущей мощности. Это интегрирование реализовано счетным механизмом 9, связанным с осью 7 червячной передачей 8.

Постоянный магнит служит для создания тормозного момента и обеспечения угловой скорости вращения, пропорциональной текущему значению активной мощности. Кроме того, в реальной конструкции есть элементы, обеспечивающий дополнительный момент, компенсирующий момент трения, а также элементы устранения «самохода».

Цель работы

Произвести частичную поверку однофазного счетчика активной энергии методом, предусматривающим применение ваттметра и секундомера.

Оборудование

Лабораторный стенд, однофазные счетчики (классы точности: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; и 3,0;)

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, имеющимися на лабораторном стенде, внести в отчет их паспортные данные.
2. Собрать схему рис. 13.13, обратив особое внимание на правильность включения генераторных зажимов образцового ваттметра PW и поверяемого счетчика PJ .

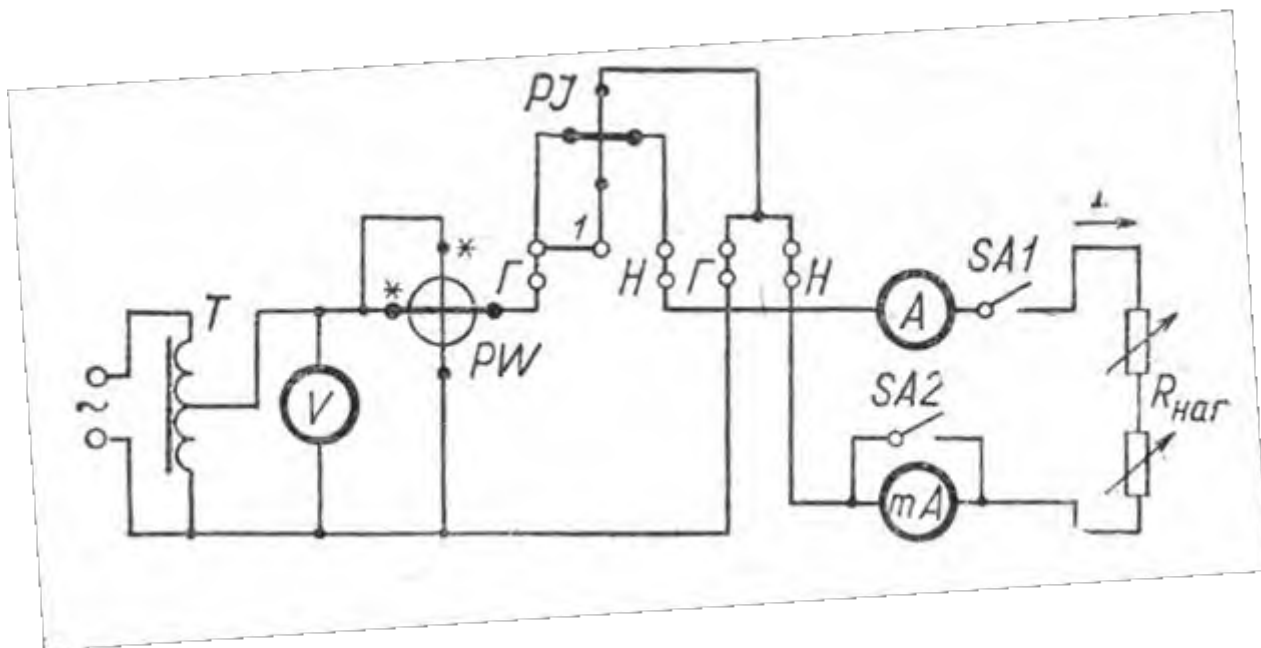


Рис.3. Схема поверки однофазного счетчика.

3. При замкнутых ключах SA1 и SA2 подать напряжение на собранную схему и установить по вольтметру с помощью однофазного регулятора напряжения Т номинальное напряжение $U_{ном}$ счетчика. Изменяя нагрузку $R_{наг}$, установить по амперметру номинальный ток $I_{ном}$ счетчика ($U_{ном}$ и $I_{ном}$ счетчика указаны на его щитке). Прогреть схему в течение 15 мин.
4. Проверить счетчик на отсутствие самохода. Для этого разомкнуть ключ SA1 и при $I=0$ по вольтметру с помощью регулятора напряжения Т установить напряжение питания счетчика равное $110\% U_{ном}$. Если при этом диск счетчика не совершает более одного полного оборота, то самоход у счетчика отсутствует.
5. Определить порог чувствительности счетчика. Для этого с помощью регулятора напряжения Т по вольтметру установить $U_{ном}$ счетчика, включить ключ SA1 и путем увеличения сопротивления нагрузки $R_{наг}$ получить минимально возможное показание амперметра, при этом диск счетчика должен быть неподвижен. Далее, разомкнуть ключ SA2 и путем плавного уменьшения сопротивления нагрузки $R_{наг}$ добиться начала движения и непрерывного вращения диска счетчика. Внести в отчет значение тока $I_{порог}$, определенное по миллиамперметру; замкнуть ключ SA2. Вычислить значение тока $I_{порог}$ в процентах $I_{ном}$.
6. Определить относительную погрешность счетчика при $U_{ном}=U$ $I=I_{ном}$. Установка значения тока $I_{ном}$ осуществляется путём изменения нагрузки $R_{наг}$ при замкнутом ключе SA2. Относительная погрешность счётчика в процентах определяется по формуле

$$\delta = \frac{W_{сч} - W}{W} 100$$

Где $W_{сч}$ – значение учтенной счётчиком энергии; W – действительное значение энергии, определенное по образцовому вольтметру.

Для определения $W_{сч}$ необходимо с помощью секундомера измерить время вращения диска счётчика при совершении N целых оборотов. Число N выбирают таким, чтобы время t было не менее 50-60 секунд. Определение интервала времени t проверяют три раза. За измеренное значение t_n берут среднее арифметическое значение из трёх измерений. Значение $W_{сч}$ определяется по формуле

$$W_{сч} = C_{ном} N,$$

Где $C_{ном}$ – номинальная постоянная счётчика:

$$C_{\text{ном}} = 3600 \cdot 1000 / N_0,$$

Здесь N_0 – передаточное число счётчика, указанное на его щитке.

Значение W определяют по формуле

$$W = P_W t_{\text{и}},$$

Где P_W – значение мощности, Вт, определенное по образцовому ваттметру:

$$P_W = c_{\text{ном}} a;$$

Здесь $c_{\text{ном}}$ – номинальная постоянная ваттметра; a – отсчёт по шкале ваттметра в делениях.

7. Используя имеющиеся в лаборатории выписки, определить заключение о допустимости определенных выше параметров счётчика с учетом обозначенного на щитке проверяемого счетчика класса точности.

8. Составить отчёт по требуемой формуле в форме.

Содержание отчёта.

1. Название и цель работы.
2. Исследуемые схемы, полученные показания приборов и результаты аналитических расчетов.
3. Выводы по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Какой измерительный механизм используется в однофазном счётчике?

2. Чему равен вращающий момент в индукционном измерительном механизме?

3. Как определить передаточное число счётчика?

4. Назовите величину, обратную передаточному числу счётчика.

5. По каким данным определяется энергия счетчика?

6. Как определить допустимую относительную погрешность счётчика в процентах?

Вывод:

19. Лабораторная работа №19 «Измерение активной мощности в трехфазной цепи цель работы».

Цель работы

1. Проверить рассмотренные в теории методы измерения активной мощности.
2. Получить практические навыки измерения активной мощности в трехфазных цепях переменного тока.

Краткие теоретические сведения.

Полная мощность цепи постоянного тока определяется по формуле: $S = UI$.

Следовательно, измеряя ток амперметром и напряжение вольтметром, можно определить полную мощность цепи.

Для измерения активной мощности переменного тока кроме амперметра и вольтметра нужен еще фазометр. Это следует из выражения .

Однако оба эти методы неудобны. На практике мощность измеряют с помощью ваттметра. В цепях постоянного тока применяются электродинамические ваттметры, а в цепях переменного тока – электродинамический или ферродинамический ваттметр, в основе принципа, действия которого лежит взаимодействие магнитных полей двух катушек при протекании по ним токов. Одна из катушек включается в измеряемую цепь последовательно с нагрузкой (как амперметр), а другая – параллельно (как вольтметр).

Это взаимодействие катушек приводит к повороту подвижной катушки и, соответственно, стрелки, укрепленной на одной оси с этой катушкой.

Измерение активной мощности в трехфазных цепях может производиться с помощью однофазных ваттметров. При этом может быть использован метод одного, двух и трех ваттметров. Применение каждого из этих методов возможно только при определенных условиях.

1. Метод одного ваттметра

Этот метод применяется для измерения активной мощности в трехфазных цепях при равномерной нагрузке фаз.

При измерении могут встретиться несколько случаев:

а) трехфазная цепь имеет нулевой провод или приемник имеет доступную нулевую точку. При этом для измерения мощности трехфазной цепи достаточно одного ваттметра, измеряющего мощность одной фазы (рис. 1).

Мощность трехфазной цепи определяют по формуле: $P = 3P_W$.

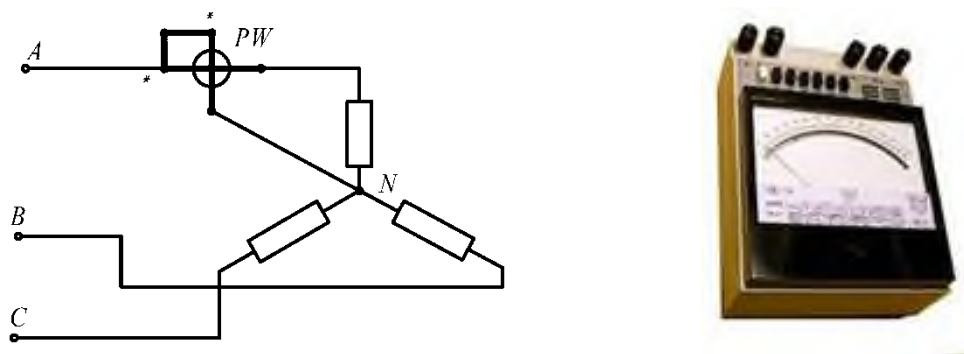


Рис. 1. Схема измерения активной мощности трехфазной цепи одним однофазным ваттметром при доступной нулевой точке

б) трехфазная цепь имеет соединение треугольником или звездой с недоступной нулевой точкой. Для измерения мощности трехфазной цепи однофазным ваттметром в этом случае нужно создать искусственную нулевую точку. Она создается с помощью активных сопротивлений, рассчитанных на номинальный ток параллельной цепи ваттметра (рис. 2). Активные сопротивления выбираются равными сопротивлению цепи обмотки напряжения ваттметра.

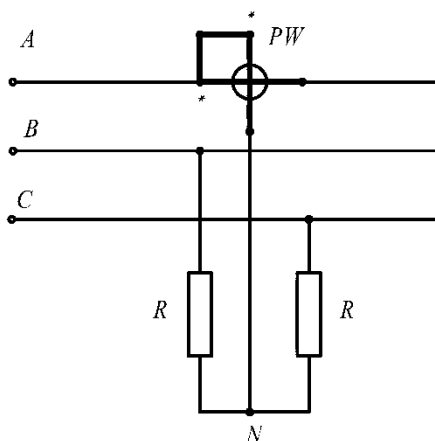


Рис. 2. Схема измерения активной мощности трехфазной цепи одним однофазным ваттметром при недоступной нулевой точке

Очевидно, что при таком включении к зажимам параллельной обмотки ваттметра приложено фазное напряжение $U_{\text{ф}}$, а по последовательной обмотке проходит ток $I_{\text{ф}}$ и, следовательно, ваттметр измеряет активную мощность одной фазы. Мощность трехфазной цепи равна $P = 3PW$.

2. Метод двух ваттметров

Этот метод применяется для измерения активной мощности в трехфазных трехпроводных цепях, как при равномерной, так и при неравномерной нагрузках независимо от способа соединения приемников энергии. В качестве измерительных приборов могут быть использованы два однофазных ваттметра или один трехфазный двухэлементный ваттметр.

Для измерения мощности трехфазной цепи по методу двух ваттметров однофазные ваттметры могут быть включены по одной из трех схем, изображенных на рис. 3.

Общая измеряемая мощность трехфазной цепи определяется в этом случае как алгебраическая сумма показаний обоих ваттметров $P = PW_1 + PW_2$.

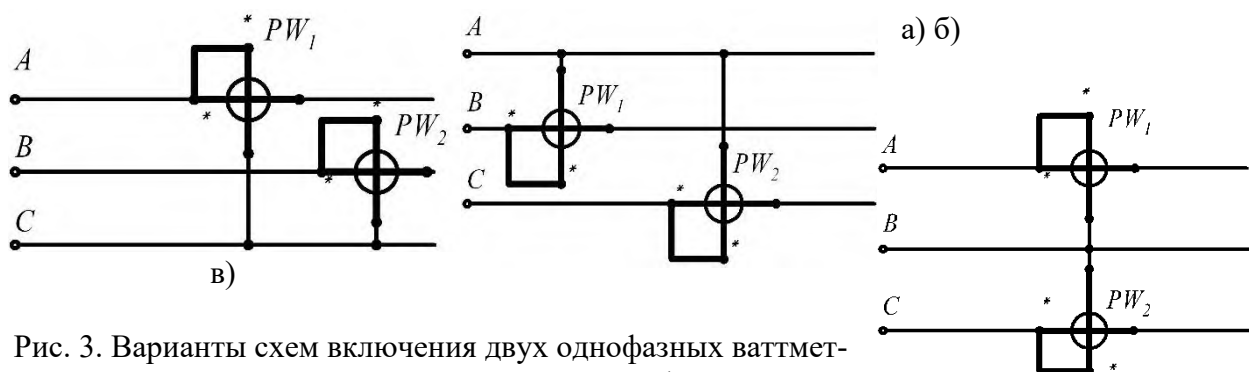


Рис. 3. Варианты схем включения двух однофазных ваттметров для измерения активной мощности в трехфазной цепи

При измерении активной мощности в трехфазной цепи двумя ваттметрами возможны некоторые частные случаи:

а) один из приборов показывает нуль. Это бывает при активно-индуктивной нагрузке, когда угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi = 60^\circ$ ($\cos\varphi = 0,5$). В этом случае активная мощность трехфазной цепи измеряется только одним ваттметром.

б) один из приборов показывает отрицательное показание. Это бывает при активно-индуктивной нагрузке, когда угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi > 60^\circ$ ($\cos\varphi < 0,5$). Для производства отсчета необходимо переключить зажимы одной из обмоток ваттметра. Активная мощность трехфазной цепи в этом случае определяется разностью показаний ваттметров.

$$P = PW_2 - PW_1 ;$$

в) оба прибора дают одинаковые показания. Это бывает при чисто активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$).

3. Метод трех ваттметров

Этот метод применяется для измерения активной мощности в трехфазных цепях с нейтральным проводом при неравномерной нагрузке фаз. В качестве измерительных приборов могут быть использованы три однофазных ваттметра или один трехфазный трехэлементный ваттметр. Ваттметры включаются по схеме, изображенной на рис. 4. Каждый из ваттметров (элементов) измеряет мощность одной из фаз.

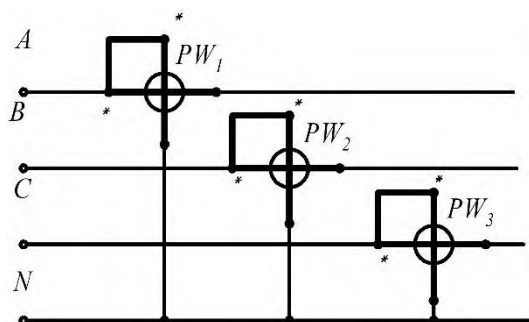


Рис. 4. Схема измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи тремя однофазными ваттметрами

Активная мощность трехфазной цепи определяется суммой показаний трех ваттметров $P = PW1 + PW2 + PW3$.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, записать их технические данные (табл. 1).

Необходимое оборудование и приборы.

- лабораторный стенд,
- ваттметр W;
- источник трёхфазного напряжения;
- соединительные провода.

Таблица 1

Технические характеристики приборов

Наименование прибора	Система прибора	Класс точности	Пределы измерений	Цена деления

2. Собрать схему, указанную на рис. 5 и проверить ее.

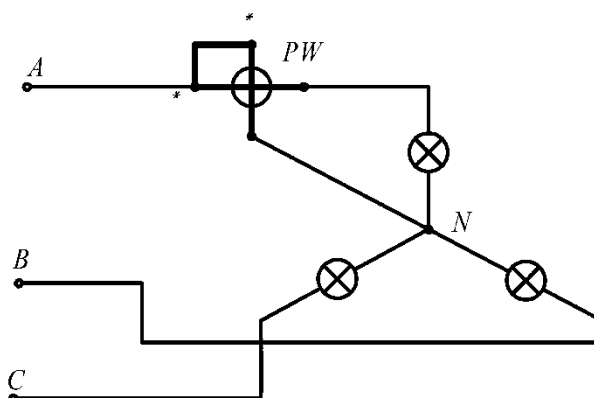


Рис. 5. Схема измерения активной мощности трехфазной цепи одним однофазным ваттметром при доступной нулевой точке

3. Установить на всех фазах равномерную нагрузку (по 5 ламп в каждой фазе, по 3 лампы в каждой фазе), измерить мощность, напряжения и токи. Данные опытов занести в табл. 2.

Результаты опытов и вычислений

Измерено											Вычислено			
№ опыта	U _{AB} , В	U _{BC} В	U _{CA} , В	U _A , В	U _B , В	U _C , В	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P, Вт	P _Σ , Вт	U _ф , В	I _ф , А	P _{расч.} Вт

4. Показать руководителю результаты опытов.

5. Разобрать схему.

6. Собрать схему, указанную на рис. 6 и проверить ее.

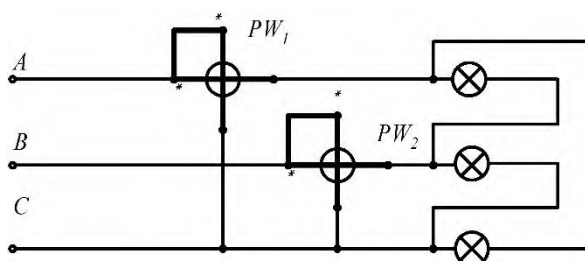


Рис. 6. Схема измерения активной мощности трехфазной цепи двумя одинаковыми однофазными ваттметрами

7. Изменяя нагрузку в фазе A (0, 3, 5 ламп), произвести измерение мощностей, напряжений и токов для всех трех опытов. При этом в фазах B и C нагрузка должна оставаться неизменной (по 5 ламп). Данные опытов занести в табл.3.

Таблица 3

Результаты опытов и вычислений

Измерено											Вычислено				
№ опыта	$U_{AB},$ В	U_{BC} В	$U_{CA},$ В	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P_{\Sigma},$ Вт	$U_{\Phi},$ В	$I_{\Phi},$ А	$P_{расч.}$ Вт

8. Показать преподавателю результаты опытов.

9. Разобрать схему, привести в порядок рабочее место.

Составить отчет по работе, который должен содержать следующие основные разделы:

- схемы опытных установок;
- техническую характеристику приборов и аппаратов;

- краткое описание порядка и характера проведенных исследований;
- таблицы измерений;
- расчетные формулы и таблицы расчетных данных;
- векторные диаграммы;
- выводы.

Обработка результатов измерений

1. Измерение мощности одним ваттметром.

Суммарная мощность P , Вт, трехфазной системы (см. табл. 2).

$$P = 3P_{\phi} .$$

На основании данных опыта рассчитать активную мощность $P_{\text{расч}}$, Вт, трехфазной системы.

$$D_{\text{дан}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi ,$$

где средние значения фазного напряжения и тока определяются как:

$$U_{\phi} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} ,$$

$$I_{\phi} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} .$$

2. Измерение мощности двумя ваттметрами.

Суммарная мощность P_{Σ} , Вт, трехфазной системы (см. табл. 5.3).

$$D_{\Sigma} = D_1 + D_2 .$$

На основании данных опыта рассчитать активную мощность $P_{\text{расч}}$, Вт, трехфазной системы.

Для равномерной нагрузки

$$D_{\text{дан}} = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi .$$

где

$$U_{\bar{e}} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3},$$

$$I_{\bar{e}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}.$$

Для неравномерной нагрузки

$$P_{\text{дв}} = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C,$$

где U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения;

U_A, U_B, U_C – фазные напряжения;

I_A, I_B, I_C – фазные (линейные) токи;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности (при только активной нагрузке $\cos \varphi = 1$).

Контрольные вопросы

1. Какой метод применяется для измерения активной мощности в трехфазной цепи при равномерной нагрузке?

2. Какой метод применяется для измерения активной мощности в трехфазной цепи при неравномерной нагрузке?

3. В каком случае при измерении активной мощности в трехпроводной цепи методом двух ваттметров:

а) показания обоих из ваттметров будут равны между собой;

б) показания одного из ваттметров будут равны нулю;

в) показания одного из ваттметров будут иметь отрицательное значение;

г) суммарное показание двух ваттметров будет равно нулю?

10. Написать формулы для определения активной, реактивной и полной мощностей в трехфазной цепи с активной, индуктивной и емкостной нагрузках.

20. Лабораторная работа № 20 «Определение номинала элементов по маркировке на корпусе».

Цель работы:

Научиться определять номиналы элементов электрических цепей по маркировке на корпусе.

Необходимое оборудование.

Персональный компьютер с установленной программой «REZISTOR».

Порядок выполнения работы.

1. По обозначению на корпусе конденсатора (согласно варианта в таблице №1) определить его номинал. Результат занести в таблицу №3.
2. По обозначению на корпусе резистора (согласно варианта в таблице №1) определить его номинал. Результат занести в таблицу №3.

Таблица №1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Конденсатор	1П1 И	16П С	Н67 И	Н22 С	5Н1 И	91Н С	2Н2И	М91 С
Резистор	К27С	51ЕИ	5К1С	65К И	41КС	12ЕИ	М80 С	1К2И

Таблица №1 (продолжение)

Вариант	9	10	11	12	13	14	15
Конденсатор	1М0 И	5М1 С	5Н0 И	6Н8С	82Н И	М56 С	51П И
Резистор	6М0С	26КИ	60ЕС	4М6 И	24КС	К66И	54КС

Примеры маркировки конденсаторов и резисторов.

Конденсаторы с номинальным значением до 100 пикофарад маркируются буквой П или латинской Р, например:

1 пФ - 1П0 или 1Р0

1,5 пФ - 1П5 или 1Р5

15 пФ - 15П или 15 Р

15,2 пФ - 15П2

Конденсаторы с номинальным значением от 100 пикофарад до 0,1 микрофарад маркируются в нанофарадах буквой Н или латинской n, например:

100 пФ (0,1 нФ) - Н10 или n10

150 пФ (0,15 нФ) - Н15

1000 пФ (1 нФ) - Н10 или 1n0

1500 пФ (1,5 нФ) - Н15

0,01 мкФ (10 нФ) - 10Н или 10n

0,068 мкФ (68 пФ) - 68Н

Конденсаторы с номинальным значением от 0,1 микрофарад и выше маркируются буквой М, например

0,1 мкФ - M10 (на некоторых видах конденсаторов такая емкость может обозначаться и в нанофарадах латинской буквой n, например 100 n=100 нФ=0,1 мкФ и т.д.)
 0,15 мкФ - M15
 0,22 мкФ - M22
 1 мкФ - 1M0
 1,5 мкФ - 1M5
 15 мкФ - 15M
 150 мкФ - 150M

При указании номинала резистора, вместо десятичной точки пишут букву, соответствующую единицам измерения (К или k — для килоОм, М или m — для мегаОм, Е или R для единиц Ом). Кроме того, любой номинал отображается максимум тремя символами. Например, 4K7 обозначает резистор, сопротивлением 4,7 кОм, 1R0 — 1 Ом, M12 - 120кОм (0,12МОм) и т. д.

- В таком виде наносить номиналы на маленькие резисторы трудно и применяют маркировку цветными полосами.

Буквенное обозначение возможного процента отклонения параметра от номинального сопротивления или емкости, приведенное в таблице №2, для резисторов и конденсаторов одинаковое. Если в обозначении номинала резистора или конденсатора используются русские буквы, то и для обозначения отклонения используют русские буквы, если в номинале латинские, то и в обозначении отклонения латинские.

Таблица №2

Допустимое отклонение емкости и сопротивления от номинальных величин, %	Кодированные обозначения
$\pm 0,1$	Ж или латинской буквой В
$\pm 0,25$	У или латинской буквой С
$\pm 0,5$	Д или латинской буквой D
± 1	Р или латинской буквой F
± 2	Л или латинской буквой G
± 5	И или латинской буквой J
± 10	С или латинской буквой K
± 20	В или латинской буквой M
± 30	Ф или латинской буквой N

Например

Маркировка на конденсаторе H51C обозначает 510 пФ $\pm 10\%$.

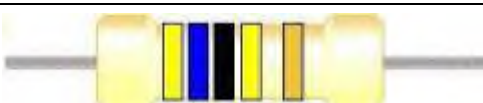
Маркировка на резисторе 10EI обозначает 10 Ом $\pm 5\%$.

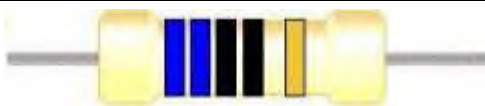
3. Запустить программу «REZISTOR». Программа определяет номинал резистора по цветным полосам на корпусе.
4. Ввести цвета полос, согласно варианта в таблице №4.
5. Результат занести в таблицу №3.

Таблица №3

Конденсатор	Резистор	
	По цифро – буквенному обозначению	По цветным полосам

Таблица №4

Вариант	Маркировка
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	

14	
15	

Список использованных источников.

Основные источники:

Электротехника. Лабораторно-практические работы: учебное пособие / И.О. Мартынова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: КНОРУС, 2023. — 136 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/949301>

Дополнительные источники:

1. Электротехника: учебник / И.О. Мартынова. — Москва: КноРус, 2023. — 304 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://book.ru/books/948719>
2. Электротехника: учебник / С.М. Аполлонский. — Москва: КНОРУС, 2023. — 293 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/>
3. Электротехника. Практикум: учебное пособие / С.М. Аполлонский. — Москва: КНОРУС, 2022. — 318 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/>
4. Электротехника. Практикум (с примерами решения задач): учебное пособие / И.С. Султангараев. — Москва : КНОРУС, 2023. — 182 с. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.book.ru/>