

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

## **ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

### **Часть II. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Допущено Общественной организацией «Международная Ассоциация  
автомобильного и дорожного образования» (МААДО)  
в качестве учебника для студентов вузов,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров  
«Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»  
(профили подготовки «Автомобили и автомобильное хозяйство»  
и «Автомобильный сервис»)

Пенза 2016

УДК 621.537  
ББК 312  
О-75

Рецензенты: кафедра «Автономные информационные и управляющие системы» Пензенского государственного университета (доктор технических наук, профессор А.И. Сидоров);  
кандидат технических наук, доцент Пензенского государственного технологического университета С.В. Чекайкин

**Общая** электротехника и электроника. Ч. II. Электротехника: учебник / Э.М. Пинт, И.Н. Петровнина, И.И. Романенко, К.А. Еличев. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 164 с.  
**ISBN 978-5-9282-1411-1**

Излагается теоретический материал раздела «Электротехника» курса «Общая электротехника и электроника», приводятся вопросы и тесты для самоконтроля.

Учебник подготовлен на кафедре «Механизация и автоматизация производства» и предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профили «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Автомобильный сервис»), изучающих дисциплину «Общая электротехника и электроника», а также для студентов других специальностей.

**ISBN 978-5-9282-1411-1**

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2016  
© Пинт Э.М., Петровнина И.Н., Романенко И.И., Еличев К.А., 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью учебника «Общая электротехника и электроника. Часть 2. Электротехника» является формирование у студентов знаний о конструкции, принципах действия, параметрах, характеристиках, областях применения основных электрических цепей и электротехнических устройств.

Теоретическая основа курса по каждой главе подкрепляется практической частью, в которой даются расчеты электрических цепей и электротехнических устройств.

Учебник подготовлен в соответствии с программой дисциплины «Общая электротехника и электроника» и предназначен для изучения студентами третьего курса, обучающимися по направлению подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профили «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования»), изучающими дисциплину «Общая электротехника и электроника», относящуюся к базовой части профессионального цикла.

Изучение курса «Общая электротехника и электроника» способствует формированию некоторых общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, предусмотренных Федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профили «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования»).

Изучение дисциплины позволит освоить образовательную программу в рамках овладения следующими компетенциями:

- использованием основных законов естественнонаучных дисциплин и профессиональной деятельности, применением методов математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией;
- владением знаниями технических условий и правил рациональной эксплуатации транспортной техники, причин и последствий прекращения ее работоспособности;

- способностью в составе коллектива исполнителей к анализу передового научно-технического опыта и тенденций развития технологий эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов;

- готовностью к участию в составе коллектива исполнителей к деятельности по организации управления качеством эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**знать:**

- основные физические явления, фундаментальные понятия и законы современной физики и электротехники;

- построение, принцип действия, характеристики основных электротехнических и электронных устройств;

**уметь:**

- применять современные математические методы в прикладных задачах профессиональной деятельности;

- диагностировать состояние электронной и электротехнической аппаратуры;

**владеть:**

- методологией проведения исследований электротехнических и электронных устройств;

- методикой расчета схем электронных и электротехнических устройств.

Знания, полученные студентами, могут быть использованы в выпускной квалификационной работе и в дальнейшей профессиональной деятельности.

Первая глава написана к.т.н., профессором Пинтом Э.М., вторая глава – к.т.н., доцентом Петровниной И.Н., третья глава – к.т.н., доцентом Романенко И.Н. и к.т.н., доцентом Еличевым К.А.

В конце каждой главы даются вопросы и тесты для самоконтроля. Учебник можно использовать для самообучения, что особенно важно для студентов заочного отделения.

## ВВЕДЕНИЕ

Для эксплуатации современных транспортно-технологических машин и комплексов, в них широко используются электрические цепи и электротехнические устройства.

В связи с вышесказанным раздел «Электротехника» дисциплины «Общая электротехника и электроника» является важным звеном в системе подготовки бакалавров направления «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов». Этот раздел дает студентам научные теоретические знания по основам электротехники и электроснабжения, а также прививает студентам практические навыки по контролю работы электрических цепей, трансформаторов и электрических машин. Чтобы студенты могли оценить величины параметров электрических цепей и электротехнических устройств, в разделе рассматриваются методы расчета или элементы расчета цепей и устройств и приводятся параметры решения конкретных задач.

В учебнике соблюдается определенная логическая последовательность изложения материала – от простого к сложному, то есть в начале рассматриваются сравнительно простые электротехнические устройства: реле, контакторы, затем – однофазный трансформатор, специальные типы трансформаторов, электрические машины постоянного тока, электрические машины переменного тока, электропривод и электроснабжение.

На рис. 1 изображена схема не сложной реальной электрической цепи постоянного тока, содержащей 6 узлов, соединенных между собой проводниками. В их числе: источник электроэнергии – аккумулятор, два приемника – электролампа и электродвигатель вентилятора, измерительные приборы – амперметр и вольтметр, а также выключатель. Поскольку реальные узлы громоздки, тяжелы и не удобны, т.к. требуют значительных площадей для размещения и подготовки их к изучению, то в электротехнике принято изучать не реальные электрические цепи, а их принципиальные и эквивалентные схемы, на которых приводятся условные графические изображения реальных узлов или их моделей, соединенных линиями так же, как соединены проводниками реальные узлы.

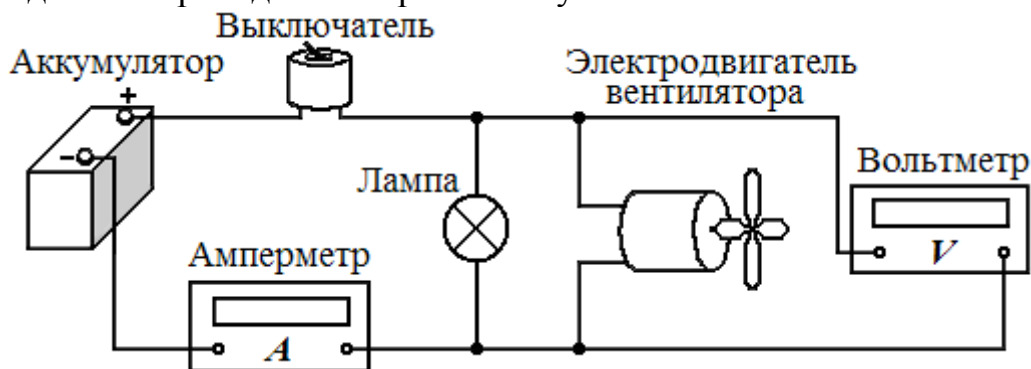


Рис. 1. Пример реальной электрической цепи постоянного тока

На рис. 2 приведены условные графические изображения большинства элементов электрических цепей.

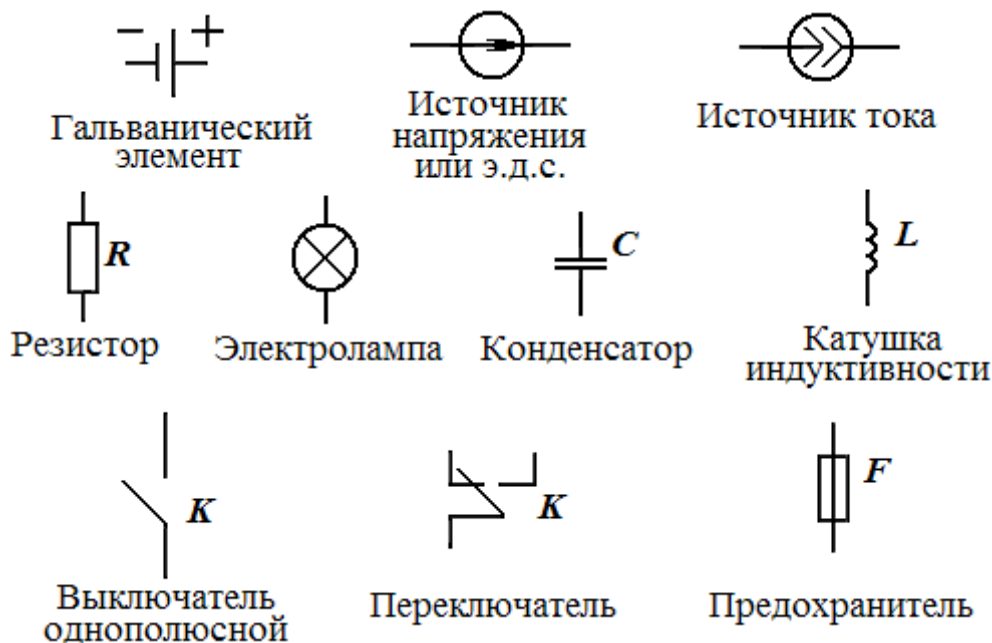


Рис. 2. Условные графические изображения элементов электрических цепей в схемах

На рис. 3 представлены принципиальная и эквивалентная схемы цепи по рис. 1 в соответствии с принятыми условными графическими изображениями элементов (см. рис. 2). Причем на эквивалентной схеме (рис. 3, а) электродвигатель вентилятора условно изображен последовательно соединенными катушкой индуктивности  $L_0$  (заменяет обмотки возбуждения статора и ротора) и резистором с сопротивлением  $R_p$ , заменяющим щеточный механизм ротора. Электрическая лампа также изображена резистором.

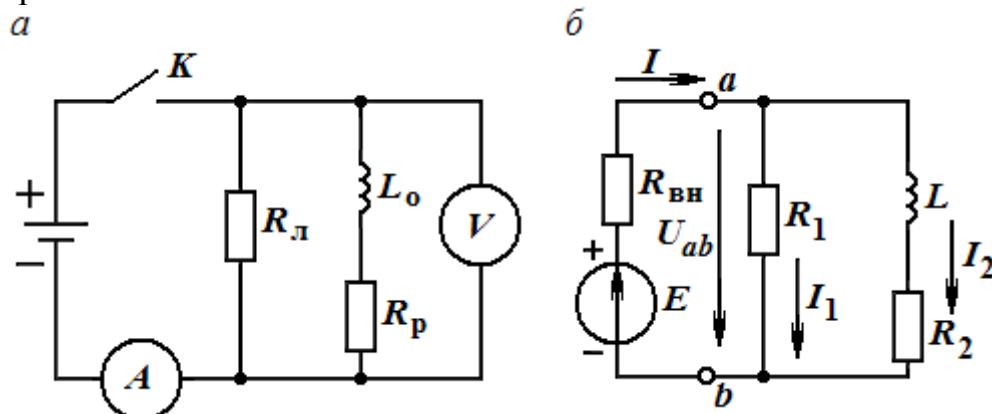


Рис. 3. Принципиальная и эквивалентная схемы электрической цепи по рис. 1

Выключатель условно показан ключом  $K$ . На эквивалентной схеме электрической цепи (рис. 3, б) не приведены коммутирующие устройства (выключатель) и измерительные приборы, т.к. они не влияют на рабочий режим работы цепи, и поэтому отнесены к вспомогательным элементам. Реальные основные элементы заменены их расчетными моделями. Так, аккумуляторная батарея представлена в виде источника Э.Д.С.  $E$  с последовательно включенным внутренним сопротивлением  $R_{\text{вн}}$ .

Целью настоящего учебника является ознакомление с процессами, происходящими в электрических цепях и овладение методикой их расчета, а также изучение ряда электромагнитных устройств и систем электропитания, элементной базы полупроводниковой электроники, принципов построения и работы типовых электронных устройств на полупроводниковых приборах (ППП).

Учебник подготовлен в соответствии с учебной программой курса «Электротехника и электроника» и предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профили «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования»), а также для студентов других специальностей университета.

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

## 1.1. Электрические цепи постоянного тока

*Определение электрической цепи и основные электрические величины*

Объектом исследования в электротехнике являются *электрические цепи* (ЭЦ), под которыми понимают совокупность устройств, обеспечивающих генерацию, передачу и использование электрической энергии. Сами устройства называются *элементами ЭЦ*.

Элементы ЭЦ подразделяются на:

1) основные, в числе которых можно выделить активные и пассивные элементы;

2) вспомогательные, к которым относят коммутирующие устройства (переключатели и реле), измерительные приборы (амперметры ( $pA$ ), вольтметры ( $pV$ ) и ваттметры ( $pW$ )), защитные устройства (предохранители) и преобразовательные устройства (трансформаторы).

К основным активным элементам ЭЦ относят устройства, генерирующие электрическую энергию, т.е. ее источники, а к пассивным – потребители электрической энергии или приемники. Активные элементы представлены источниками напряжения (или э.д.с.) и тока, а пассивные – резистивным, индуктивным и емкостным элементами.

В электротехнике принято изучать не реальные ЭЦ, а их принципиальные и эквивалентные схемы, на которых приводятся условные графические обозначения (УГО) реальных элементов или их моделей, соединенные линиями так же, как соединены проводниками реальные элементы.

По виду тока ЭЦ делятся на цепи постоянного и переменного тока, причем под постоянным током понимают ток, не изменяющийся во времени  $t$ . По характеру параметров элементов цепи подразделяются на линейные и нелинейные. К первой категории относятся цепи, у которых электрическое сопротивление  $R$  каждого участка не зависит от значений и направлений тока и напряжения.

По сложности все ЭЦ делятся на простые (неразветвленные) и сложные (разветвленные). В простых цепях все элементы соединены последовательно и в них протекает один и тот же ток. К сложным цепям относятся цепи с разветвлениями.

Основными понятиями, характеризующими конфигурацию цепи, являются ветвь, узел и контур.

*Ветвь* – это участок цепи, состоящий из одного или нескольких соединенных между собой элементов, по которому протекает один и тот же ток. *Узел* – точка цепи, к которой подключено не менее трех ветвей. *Контур* – замкнутый путь, состоящий из нескольких ветвей и проходящий по ним однократно.



Основными величинами, характеризующими состояние электрической цепи, являются электрический ток, напряжение и мощность. Под электрическим током  $I$  в проводниках понимают упорядоченное движение электронов, интенсивность (значение) которого равно отношению количества  $dq$  переносимого ими заряда (или количества электричества) через поперечное сечение проводника за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.1)$$

В системе СИ заряд измеряется в кулонах (Кл), время – в секундах (с), а ток – в амперах (А). Сопротивление амперметра  $pA$  должно быть близким к нулю. Напряжение  $U$  в электротехнике определяется как отношение работы  $dA$ , затрачиваемой электрическим полем на перемещение единицы заряда  $dq$  из одной своей точки в другую, к величине этого заряда:

$$U = \frac{dA}{dq}. \quad (1.1.2)$$

В системе СИ работа измеряется в джоулях, а единица измерения напряжения названа вольт (В). Сопротивление вольтметра  $pV$  должно быть близким к бесконечности. Напряжение  $U$  связано с током  $I$  и потребляемой мощностью  $P$  соотношением

$$P = UI, \quad (1.1.3)$$

из которого вытекает более простое выражение для электрического напряжения:  $U = P/I$ . Отсюда видно, что если приложенное к цепи напряжение 1 вольт способно вызвать в ней ток 1 Ампер, то мощность такой цепи составит 1 ватт. Учитывая эквивалентность работы  $A$  из выражения (1.1.2) электрического поля и его энергии  $W$  как способности совершать эту работу, очевидно следующее соотношение:

$$W = \int_0^Q U \cdot dq = \int_{-\infty}^t P \cdot dt = \int_{-\infty}^t U \cdot I \cdot dt. \quad (1.1.4)$$

Мощность измеряется в ваттах ( $\oint H \cos \alpha dl = I_1 w_1 - I_2 w_2$ ), а энергия – в Вт-часах или кВт-часах. Ваттметр  $pW$  содержит внутри два измерительных механизма – токовый и напряжения, которые должны удовлетворять тем же условиям.

*Элементы электрических цепей: определение и основные особенности*

Источники электрической энергии, т.е. *активные основные элементы* цепей, делятся на источники э.д.с. (*напряжения*) и источники тока.

Э.д.с. или *электродвижущей силой* называют способность источника выполнять работу по перемещению носителей электричества в цепи. Под *источником напряжения* (ИН  $U_{AB}$  или э.д.с.  $\sum H \cdot l = \sum I \cdot w$ ) понимают такой идеализированный элемент, напряжение  $U_{AB}$  на выходе которого не зависит от тока, отдаваемого во внешнюю цепь, и в режиме «холостого хода» (без нагрузки) равно э.д.с.  $E$ . На рис. 1.1.1 показаны его условное графическое обозначение (УГО) и вольтамперная характеристика (ВАХ).

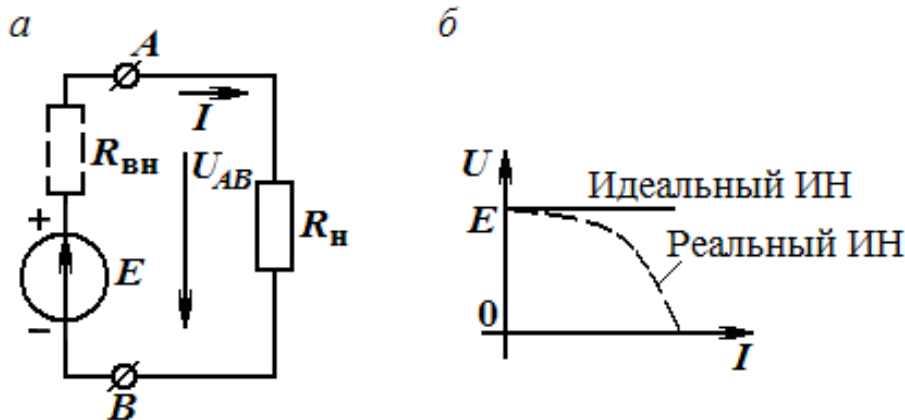


Рис. 1.1.1. Условное графическое обозначение (а) и вольтамперная характеристика (б) источника напряжения

*Источником тока* (ИТ) считают такой идеализированный источник электрической энергии, который создает в электрической цепи ток  $I_{ИТ}$ , равный току  $I_{кз}$  в режиме «короткого замыкания» и не зависящий ни от сопротивления нагрузки, к которой он подсоединён, ни от напряжения  $U$  на нем. ВАХ *источника тока* и его УГО представлены на рис. 1.1.2. В источниках направления тока  $I$  и напряжения  $U_{AB}$  (см. рис. 1.1.1), а на рис. 1.1.2 – направления  $I_{ИТ}$  и  $U$  противоположны, а в приемниках – они совпадают. Реальные ИН и ИТ отличаются от идеальных тем, что обладают ограниченной мощностью и допускают потери энергии (условно показаны в виде внутренних сопротивлений ИН и ИТ, т.е.  $R_{вн}$  и  $R_i$  на рис. 1.1 и 1.2, соответственно).

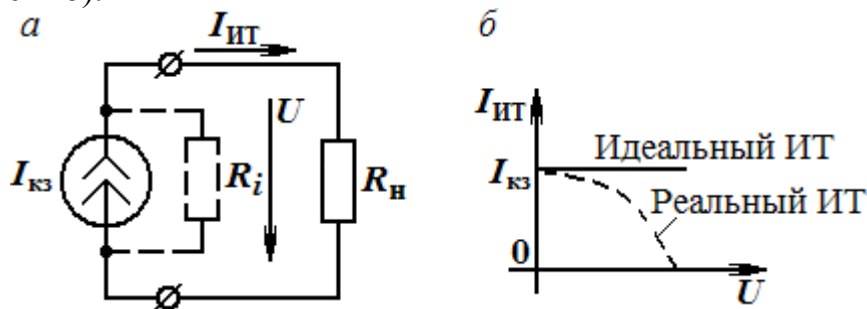


Рис. 1.1.2. Условное графическое обозначение (а) и вольтамперная характеристика (б) источника тока

*Пассивные основные элементы*, к которым относятся резистивный, индуктивный и емкостный элементы, являются потребителями (приемниками) энергии источников.

Под *резистивным элементом* электрической цепи понимают такой идеализированный элемент, в котором происходит только необратимое преобразование электрической энергии в тепло. Условное графическое обозначение резистивного элемента (называемого *резистором*) представлено на рис. 1.1.3, а. ВАХ элемента (приведена на рис. 1.1.3. б) определяется законом Ома, который устанавливает пропорциональность между током  $I$  через него и падением  $U$  напряжения на нем:

$$U = R \cdot I \text{ либо } I = G \cdot U. \quad (1.1.5)$$

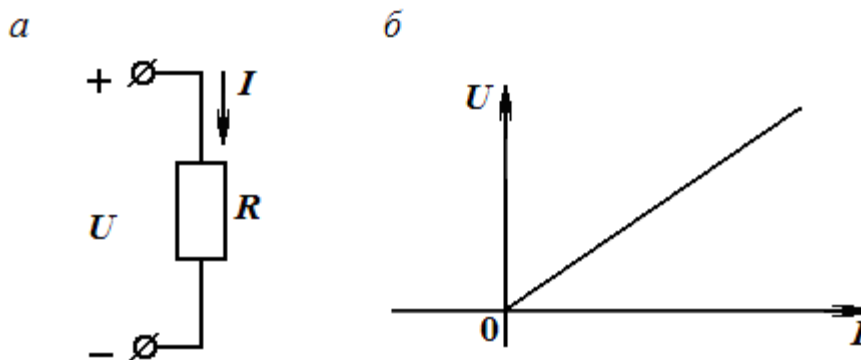


Рис. 1.1.3. Условное графическое обозначение (а) и вольтамперная характеристика (б) резистивного элемента

Коэффициент пропорциональности между напряжением и током, называется *электрическим сопротивлением*  $R$ . Величина, обратная  $R$ , называется *проводимостью*  $G$  (электропроводностью), т.е.

$$R = \frac{U}{I} \text{ и } G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}. \quad (1.1.6)$$

Единицы их измерения получили название ом (Ом) и сименс (См), соответственно. Мощность, потребляемая резистивным элементом, согласно соотношениям (1.1.3) и (1.1.4) равна:

$$P = R \cdot I^2 = G \cdot U^2 \quad (1.1.7)$$

и является квадратичной функцией тока или напряжения. Поэтому она не может принимать отрицательных значений. Следовательно, электрическая энергия всегда поступает от источника в элемент – резистор. Энергия, потребляемая резистором, равна:  $W_R = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = U^2 \cdot t / R$ .

*Индуктивный элемент* – это такой идеализированный элемент, в котором создается магнитное поле с магнитным потоком  $\Phi$  и происходит накопление только магнитной энергии, но отсутствуют потери в виде тепла.

Условное графическое изображение индуктивного элемента показано на рис. 1.4.

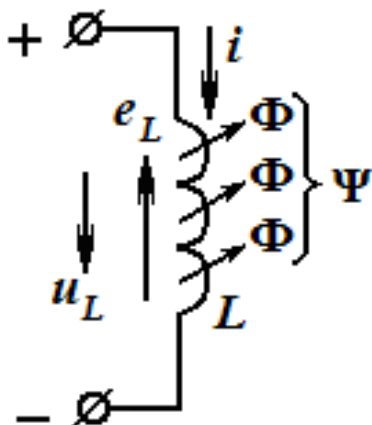


Рис. 1.1.4. Условное графическое изображение индуктивного элемента

Основным его параметром является *индуктивность*  $L$ , которая служит коэффициентом пропорциональности между создаваемым ей общим магнитным потоком  $\Phi$ , названным *потокосцеплением*  $\Psi = \Sigma \Phi$ , и током  $I$  в катушке, т.е.

$$\Psi = L \cdot I. \quad (1.1.8)$$

Это справедливо только при отсутствии у катушки ферромагнитных тел (сердечника). Единица измерения индуктивности названа *генри*, причем  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А}$ . Если на катушку индуктивности подается ток  $I$ , то в момент его включения в каждой ее витке образуется магнитный поток  $\Phi$ ,

изменение которого создает на выводах э.д.с.  $e_L$  индукции и напряжение  $u_L$ , компенсирующее действие  $e_L$ , равное

$$u_L = -e_L = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (1.1.9)$$

Если к катушке подвести напряжение  $u_L$ , то, проинтегрировав обе части выражения (1.1.9) в пределах от 0 до  $t$ , можно определить характер изменения в ней тока  $i$ , т.е.

$$i = \frac{1}{L} \int u_L dt \quad (1.1.10)$$

и тем самым подтвердить свойство накопления магнитной энергии (т.к. поток  $\Phi$  пропорционален току). Закон изменения тока  $i$  в катушке является нарастающим, причем ток в идеальной катушке стремится к бесконечности, что может вызвать короткое замыкание источника напряжения постоянного тока. Учитывая (1.1.8), мгновенная мощность, выделяемая на индуктивном элементе при его подключении к источнику, равна

$$p_L = u_L \cdot i = L \frac{idi}{dt} \quad (1.1.11)$$

Энергия, запасенная в индуктивном элементе, пропорциональна квадрату тока:

$$W_L = \int_{-\infty}^t p_L dt = L \int \frac{idi}{dt} = L \frac{i^2}{2}. \quad (1.1.12)$$

Поэтому она не может принимать отрицательных значений.

*Емкостный элемент* – это такой идеализированный элемент, в котором создается электрическое поле и происходит только накопление электрической энергии. Условное графическое изображение емкостного элемента показано на рис. 1.1.5. Близким к нему является конденсатор, который представляет собой две металлические пластины, разделенные слоем диэлектрика. Его основным параметром считается электрическая емкость  $C$ , служащая коэффициентом пропорциональности между накопленным в конденсаторе зарядом  $q$  и подведенным к нему напряжением  $u$ , т.е.

$$q = C \cdot u. \quad (1.1.13)$$

В системе СИ емкость измеряется в фарадах (Ф), причем  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{В}$ . Ток через конденсатор определяется из выражения (1.1.13):

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (1.1.14)$$

Если конденсатор подключить к источнику тока  $i_C$ , то, проинтегрировав обе части выражения (1.1.14) в пределах от 0 до  $t$ , можно определить характер изменения его заряда и напряжения на выводах:

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt. \quad (1.1.15)$$

В результате подтверждается способность к накоплению заряда конденсатором, выражающаяся в росте напряжения  $u_C$  на его выводах. Мощность, потребляемая емкостным элементом, равна

$$p_C = u_C \cdot i_C = u_C \cdot C \frac{du_C}{dt}. \quad (1.1.16)$$

Запасенная в емкости энергия определяется значением напряжения в данный момент времени и пропорциональна его квадрату:

$$W_C = \int_0^t p_C dt = C \int_0^{u_C} u_C du_C = \frac{C U_C^2}{2}. \quad (1.1.17)$$

Поэтому она также не может принимать отрицательных значений. В табл. 1.1.1 даны соотношения между напряжениями и токами элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Из таблицы видно, что в выражениях для  $u_L$ ,  $i_C$ ,  $u_C$ ,  $i_L$  имеется определенная аналогия, если в выражениях поменять  $u_L$  на  $i_C$ ,  $u_C$  на  $i_L$  и т.д. Такие соотношения, обладающие свойствами взаимного перехода друг в друга, называются *дуальными*, при этом взаимозаменяемые величины являются *дуальными величинами*, а элементы, характеристики которых

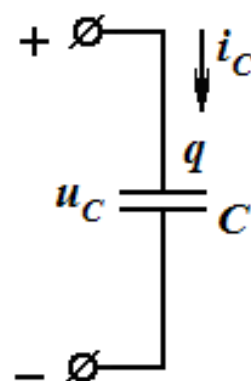


Рис. 1.1.5. Условное графическое изображение емкостного элемента

дуальны – дуальными элементами. Взаимно дуальными являются следующие величины:

$$R \leftrightarrow g; L \leftrightarrow C; i \leftrightarrow u; p_R \leftrightarrow p_g; W_L \leftrightarrow W_C; p_L \leftrightarrow p_C.$$

Т а б л и ц а 1.1.1

Элемент	В А Х		
	$u = f(i)$	$i = f(u)$	$p, W$
$R$	$u_R = Ri_R$	$i_R = gu_R$	$p_R = Ri_R^2 = gu_R^2$
$L$	$u_L = L \frac{di_L}{dt}$	$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$	$W_L = \frac{Li_L^2}{2}$
$C$	$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$	$i_C = C \frac{du_C}{dt}$	$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}$

Целью электротехники является расчет ЭЦ, который заключается в определении по заданным значениям источников энергии и параметров ее приемников, токов в ветвях или напряжений между узлами.

При этом анализу подвергается не реальная ЭЦ, а ее электрическая схема, в которой вместо реальных элементов изображаются их модели, соединенные между собой линиями, так же как в реальной цепи соединены проводами реальные элементы. Определяемые токи и напряжения на элементах считаются *реакциями* цепи.

В электротехнике часто элементы электрической цепи представляют в виде двухполюсного (рис. 1.1.6, а) или четырехполюсного элементов (рис. 1.1.6, б), которыми могут быть либо отдельным элементом цепи, либо ее фрагментом.

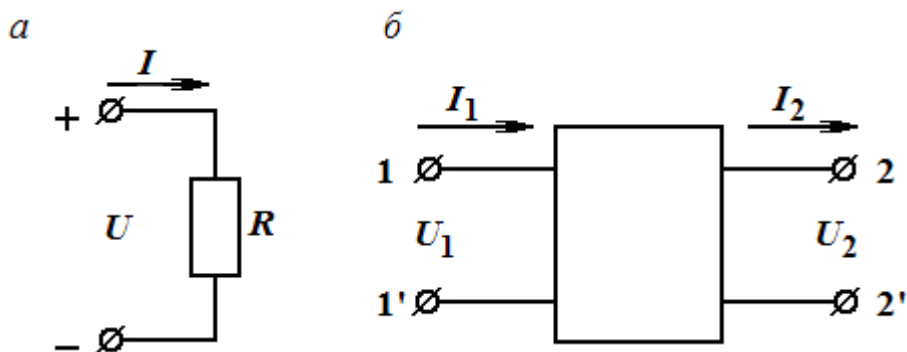


Рис. 1.1.6. Двухполюсной (а) и четырехполюсной (б) элементы

*Законы электротехники*

Основными законами электротехники являются: закон Ома, который имеет две формы – для ветви с пассивным элементом (определяется ток через элемент как отношение падения напряжения на нем к его сопротивлению) и для участка цепи с пассивными и активными элементами, а также два закона Кирхгофа.

Закон Ома на участке цепи с активными и пассивными элементами называется *обобщенным законом* и для цепи, приведенной на рис. 1.1.7, имеет вид:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E_1 - E_2}{R} = \frac{U_{ac} + E_1 - E_2}{R}, \quad (1.1.18)$$

где  $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$  – напряжение на участке  $ac$ , найденное как разность потенциалов точек  $a$  и  $c$ . Знаки перед  $E_1$  и  $E_2$  определяются по направлениям э.д.с. и тока в цепи.

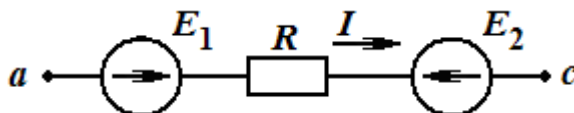


Рис. 1.1.7. Участок цепи с активными и пассивными элементами

*Первый закон Кирхгофа* касается узлов и формулируется так: алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:

$$\sum \pm i_k = 0. \quad (1.1.19)$$

*Второй закон Кирхгофа* (для контуров) формулируется следующим образом: алгебраическая сумма падений напряжений в замкнутом контуре равна алгебраической сумме э.д.с. источников, действующих в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n \pm u_k = \sum_{i=1}^m \pm E_i, \quad (1.1.20)$$

или

$$\sum_{k=1}^n \pm R_k \cdot i_k = \sum_{i=1}^m \pm E_i. \quad (1.1.21)$$

Для его применения в контуре необходимо выбрать направление обхода. Если направление обхода контура совпадает с направлением тока через элемент, то ставится знак  $\dot{U}_{1X} \approx -\dot{E}_1$  и  $\dot{U}_{2X} = \dot{E}_2$ , в противном случае ставится знак  $U_{2m} = 210$ . Аналогично учитывают в контуре и направления э.д.с. Законы Кирхгофа применяются для расчета сложных (разветвленных) ЭЦ с несколькими источниками и для разработки методов, упрощающих их расчет. Расчет любых ЭЦ с одним источником производится путем эквивалентных преобразований, учитывающих способы соединения элементов.

*Преобразование цепей с последовательным и параллельным соединением*

На рис. 1.1.18 показана схема цепи из последовательно соединенных элементов с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_n$ .

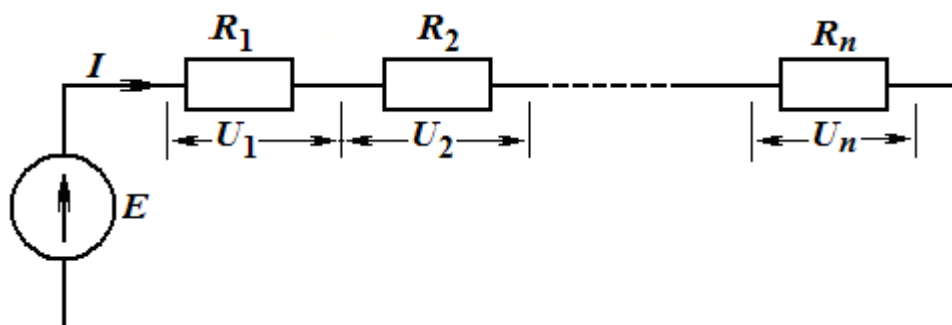


Рис. 1.1.8. Схема цепи из последовательно соединенных элементов

Через все элементы протекает один и тот же ток  $I$ , напряжение на входе цепи, согласно 2-му закону Кирхгофа, должно равняться сумме падений напряжения на элементах, т.е.

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = E.$$

Используя уравнения резистивных элементов  $U_k = R_k I_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ), получим:  $E = I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) = I \cdot R_{\text{посл.}}$ .

Здесь эквивалентное входное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений последовательно соединённых элементов:

$$R_{\text{посл}} = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (1.1.22)$$

На рис. 1.1.9 приведена схема цепи из параллельно соединенных элементов с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_n$  схемы. На всех элементах имеется одно и то же напряжение, а ток  $I$  в узле, согласно 1-му закону Кирхгофа, должен равняться сумме токов элементов, т.е.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Учитывая закон Ома, получим

$$\frac{E}{R_{\text{пар}}} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \dots + \frac{E}{R_n},$$

откуда имеем

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}; \text{ или } \frac{1}{R_{\text{пар}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (1.1.23)$$



Учитывая, что проводимость равна  $g = \frac{1}{R}$ , получим

$$g_{\text{пар}} = \sum_{i=1}^n g_i.$$

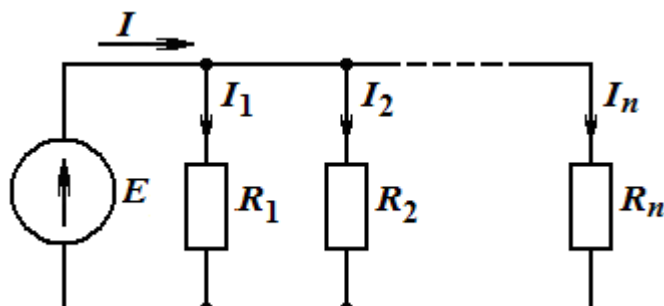


Рис. 1.1.9. Схема цепи из параллельно соединенных элементов

В случае наличия в ЭЦ и последовательного, и параллельного соединений элементов (называется *смешанным соединением* элементов), следует выделить в ней участки с такими соединениями и находить эквивалентные значения сопротивлений этих участков отдельно друг от друга.

Начинать расчет следует с конца схемы ЭЦ и путем замены ее участков резисторами с новыми значениями сопротивлений продолжить ее упрощение (свертывания), добиваясь получения самой простой схемы, состоящий из 2-х элементов: источника и общего сопротивления всей цепи. Кроме уже рассмотренных схем соединения элементов часто встречаются схемы, называемые «звездой» и «треугольником».

#### *Преобразование соединения элементов в виде звезды в эквивалентный треугольник и наоборот*

Соединение трех резисторов с сопротивлениями  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{31}$  так, что они образуют собой стороны треугольника (рис. 1.1.10, б), называют «треугольник», а соединение трех резисторов с сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  так, как показано на рис. 1.1.10, а, (в виде трехлучевой звезды), называют «звездой».

Часто при расчете электрических цепей оказывается полезным преобразовать треугольник в звезду и наоборот. Эквивалентным это преобразование будет, если подводящие к т.т. 1, 2 и 3 токи в обеих схемах одинаковы.

Из теоретической электротехники известно, что формулы для определения сопротивлений  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{31}$  элементов треугольника по известным сопротивлениям  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  элементов звезды имеют вид:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}. \quad (1.1.24)$$

Если известны сопротивления резисторов  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{31}$ , т.е. задан треугольник, то формулы для обратного преобразования (треугольник в звезду) имеют иной вид:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (1.1.25)$$

Переходим к изучению методов расчета сложных ЭЦ постоянного тока с несколькими источниками.

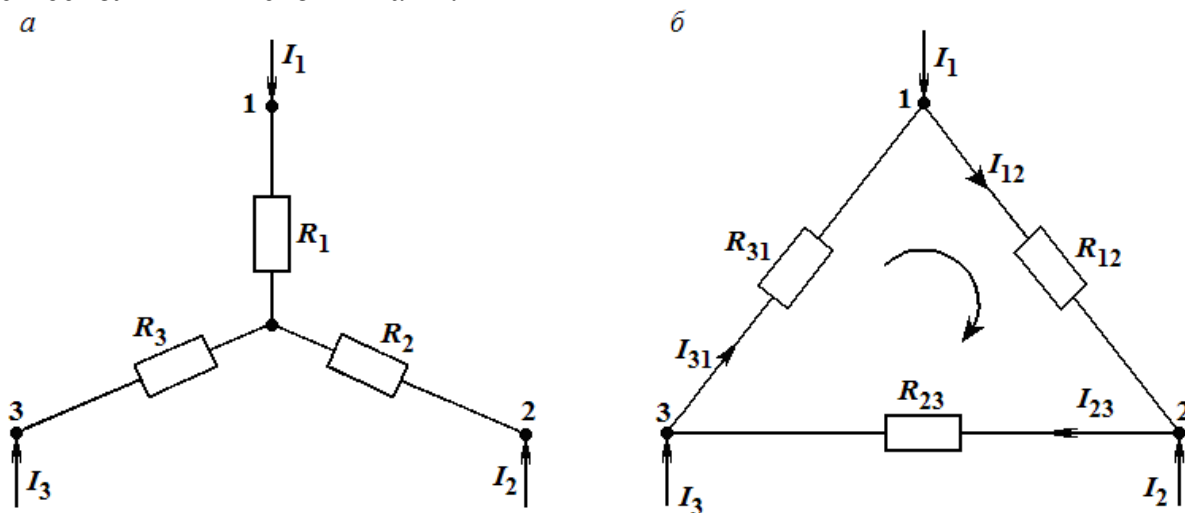


Рис. 1.1.10. Соединение резисторов «звездой» (а) и «треугольником» (б)

### *Расчет сложных цепей с несколькими источниками*

Для этого разработаны следующие методы:

1. Метод с использованием законов Кирхгофа.
2. Метод контурных токов.
3. Метод узловых потенциалов и его упрощенный вариант – метод 2-х узлов.

4. Метод наложения.

5. Метод эквивалентного генератора (или эквивалентного источника).

Их особенности рассмотрим на одном и том же примере.

Пусть имеется ЭЦ постоянного тока (рис. 1.1.11), у которой:  $E_1=80$  В,  $E_2=64$  В,  $R_1=6$  Ом,  $R_2=4$  Ом,  $R_3=3$  Ом и  $R_4=1$  Ом. Найти токи в ветвях этой цепи.

1. Расчет цепи методом законов Кирхгофа.

Этот метод считается наиболее трудоемким. Количество уравнений, которое надо составить по первому закону Кирхгофа, составляет  $Y_1 = N_y - 1$ , а по второму закону Кирхгофа –  $Y_2 = N_B - Y_1 - N_T$ , где  $N_B$  – число ветвей,  $N_T$  – число ветвей с источниками тока,  $N_y$  – число узлов. Порядок расчёта заключается в следующем:

1. Задается произвольное направление токов в ветвях.
2. Выбирается направление обхода контуров, причём для получения независимых контуров необходимо, чтобы в каждом контуре была бы одна новая ветвь.

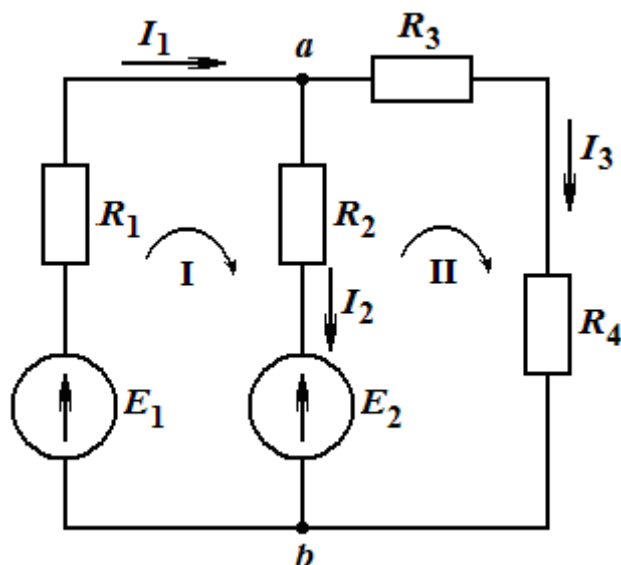


Рис. 1.1.11. Электрическая цепь постоянного тока

3. Составляются уравнения по первому и второму законам Кирхгофа; общее количество уравнений должно быть равно количеству неизвестных токов.

*Решение.*

В этой цепи 2 узла, 2 контура и 3 ветви, т.е.  $N_U = 2$ ,  $N_B = 3$  и  $N_T = 0$ . Произвольно направляем токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  в ветвях и определяемся с обходом контуров (по часовой стрелке). По первому закону Кирхгофа имеем право составить только одно уравнение:  $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ .

По второму закону составляем два оставшиеся уравнения:

Контур 1:  $I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1 + E_2$ .

Контур 11:  $-I_2 R_2 + I_3 (R_3 + R_4) = -E_2$ .

Подставив в эти уравнения известные из условия параметры источников и резисторов и переписав первое уравнение, получим следующую систему:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\ 6I_1 + 4I_2 &= 144 \\ -4I_2 + 4I_3 &= -64. \end{aligned}$$

Решая ее по методу Крамера, получим:  $I = 14$  А,  $I_2 = 15$  А и  $I_3 = -1$  А. Отрицательный результат указывает на неправильно выбранное направление тока.

Как упоминалось выше, основным недостатком метода с использованием законов Кирхгофа является большая трудоемкость вычислений,

поскольку более сложные цепи ведут к увеличению числа уравнений и повышению ранга матриц и определителей. Упрощению вычислений при расчете цепей по законам Кирхгофа способствует применение программы *MATCAD*.

### *Применение ЭВМ и программы MATCAD для расчета ЭЦ постоянного тока по законам Кирхгофа*

Матричная форма записи уравнений Кирхгофа:

$$A \cdot I = B \cdot E,$$

где  $A$ ,  $B$  – квадратные матрицы коэффициентов при токах и напряжениях порядка  $N_B \times N_B$ ;

$I$ ,  $E$  – матрицы-столбцы неизвестных токов и заданных э.д.с.

Элементами матрицы  $A$  являются коэффициенты при токах в левой части уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Первые  $N_U - 1$  строки матрицы  $A$  содержат коэффициенты при токах в уравнениях, составленных по первому закону Кирхгофа, и имеют элементы +1, -1 и 0 в зависимости от того, с каким знаком входит данный ток в уравнение.

Элементы следующих  $(N_B - N_U + 1)$  строк матрицы  $A$  равны значениям сопротивлений при соответствующих токах в уравнениях, составленных по второму закону Кирхгофа, с соответствующим знаком. Элементы матрицы  $B$  равны коэффициентам при Э.Д.С. в правой части уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Первые  $N_U - 1$  строки матрицы имеют нулевые коэффициенты, т.к. Э.Д.С. в правой части уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа, отсутствуют. Остальные  $N_B - N_U + 1$  строки содержат элементы +1, -1 в зависимости от того, с каким знаком входит э.д.с. в уравнение, и 0, если Э.Д.С. в уравнения не входит.

Общее решение уравнений, составленных по законам Кирхгофа:

$$I = (A^{-1} \cdot B) E = G \cdot E,$$

где  $G = A^{-1} \cdot B$  – матрица проводимостей.

Уменьшение числа уравнений для расчета обеспечивают *метод контурных токов* и *метод узловых потенциалов*.

#### *2. Расчет цепи методом контурных токов.*

Метод контурных токов основан на определении так называемых контурных токов в независимых контурах и последующем нахождении по ним токов в ветвях. Количество уравнений, которое необходимо составить по *методу контурных токов*, равно числу контуров.

Оценим его особенности на том же примере, для чего введем в цепь кроме искомых токов так называемые контурные токи  $I_{11}$  и  $I_{22}$  (рис. 1.1.12) и составим уравнения для них по 2-му закону Кирхгофа:

$$I_{11}R_{11} - I_{22}R_{12} = E_{11}u - I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} = E_{22}.$$

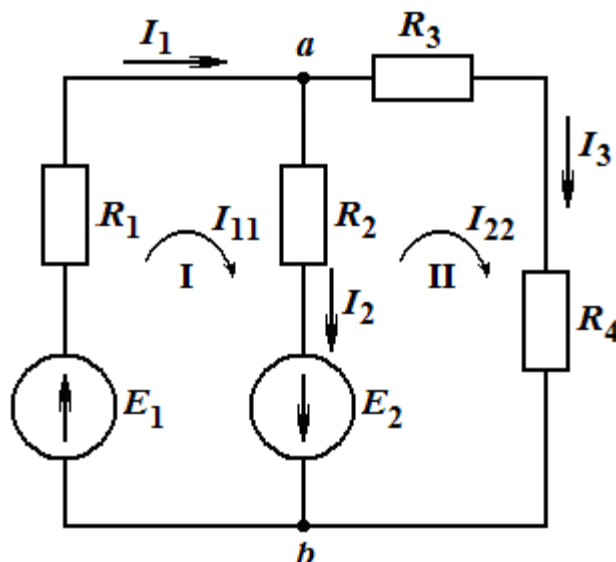


Рис. 1.1.12. Электрическая цепь постоянного тока с контурными токами

В этих уравнениях обозначены:

$R_{11} = R_1 + R_2 = 6 + 4 = 10$  Ом и  $R_{22} = R_2 + R_3 + R_4 = 4 + 3 + 1 = 8$  Ом – собственные сопротивления контуров;

$R_{12} = R_{21} = R_2 = 4$  Ом – взаимные сопротивления контуров, т.к. принадлежат обоим контурам.

$E_{11} = E_1 + E_2 = 80 + 64 + 144$  В и  $E_{22} = -E_2 = -64$  В – контурные э.д.с.

Подставив известные значения параметров элементов схемы в уравнения, получим следующую систему:

$$\begin{aligned} 10 I_{11} - 4 I_{22} &= 144 \\ -4 I_{11} + 8 I_{22} &= -64, \end{aligned}$$

решив которую, найдем значения контурных токов:  $I_{11} = 14$  А и  $I_{22} = -1$  А. Из анализа схемы вытекает, что токи в ветвях  $I_1$  и  $I_3$  равны соответствующим контурным токам, т.е.

$$I_1 = I_{11} = 14 \text{ А и } I_3 = I_{22} = -1 \text{ А.}$$

Ток во второй ветви находим из уравнения для токов узла  $a$ :

$$I_{11} - I_2 - I_{22} = 0, \text{ откуда}$$

$$I_2 = I_{11} - I_{22} = 14 - (-1) = 15 \text{ А.}$$

Таким образом, этот метод обеспечил получение тех же результатов с использованием не 3-х уравнений, а только двух, что подтверждает снижение трудоемкости вычислений.

### 3. Расчет цепи методом узловых потенциалов.

Этот метод позволяет уменьшить количество уравнений до  $N_y - 1$ . Сущность его заключается в том, что вначале определяются потенциалы всех узлов схемы, а токи ветвей, соединяющих узлы, определяются с

помощью обобщенного закона Ома. При составлении уравнений вначале полагают равным 0 потенциал какого-либо узла (его называют базисным). Для определения потенциалов других узлов составляется следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
&\varphi_1 g_{11} - \varphi_2 g_{12} - \dots - \varphi_S g_{1S} - \dots - \varphi_{1N} g_{1N} = \sum_1 E g + \sum_1 I; \\
&-\varphi_1 g_{21} + \varphi_2 g_{22} - \dots - \varphi_S g_{2S} - \dots - \varphi_N g_{2N} = \sum_2 E g + \sum_2 I; \\
&\text{-----} \\
&-\varphi_1 g_{S1} - \varphi_2 g_{S2} - \dots + \varphi_S g_{SS} - \dots - \varphi_N g_{SN} = \sum_S E g + \sum_S I; \\
&\text{-----} \\
&-\varphi_1 g_{1N} - \varphi_2 g_{N2} - \dots - \varphi_S g_{NS} - \dots + \varphi_N g_{NN} = \sum_N E g + \sum_N I,
\end{aligned} \tag{1.25}$$

Где  $g_{ss}$  – сумма проводимостей ветвей, присоединенных к узлу  $s$ ;

$g_{sq}$  – сумма проводимостей ветвей, соединяющих узел  $s$  с узлом  $q$ ;

$\sum_s Eg$  – алгебраическая сумма произведений э.д.с. ветвей, примыкающих к

узлу  $s$ , на их проводимость, при этом знак «+» присваивают тем из них, в ветвях которых Э.Д.С. действует в направлении узла  $s$ , и со знаком «-» – в направлении от узла  $s$ ;

$\sum_s I$  – алгебраическая сумма источников тока, присоединенных к узлу  $s$ ,

при этом со знаком «+» берутся те токи, которые направлены к узлу  $s$ , а со знаком «-» – в направлении от узла  $s$ . Применим этот метод к расчету цепи по рис. 1.1.11.

Заземлим узел  $b$  (рис. 1.1.13), тогда уравнение для токов узла,  $a$  можно выразить и найти через проводимости и Э.Д.С. ветвей, следующим образом:

$$I_A = g_1 E_1 - g_2 E_2 = E_1/R_1 - E_2/R_2 = 80/6 - 64/4 = -32/12 \text{ A.}$$

Определим собственную проводимость узла  $a$ :

$$g_1 + g_2 + g_3 = 1/6 + 1/4 + 1/4 = 4/6 \text{ 1/O}_M.$$

Находим потенциал узла  $a$ . Так как  $g_{11}\phi_A = I_A$ , то  $\phi_A = 32 \cdot 6 / 12 \cdot 4 = -4$  В.

Тогда искомые токи в ветвях равны:

$$I_1 = \frac{E_1 - \varphi_A}{R_1} = \frac{80 + 4}{6} = 14A; \quad I_2 = \frac{\varphi_a + E_2}{R_2} = \frac{-4 + 64}{4} = 15A;$$

$$I_3 = \frac{\varphi_A}{R_3 + R_4} = \frac{-4}{4} = -1A.$$

Как видно из решения, данный метод также более простой, чем по законам Кирхгофа.

4. *Метод 2-х узлов* – разновидность метода узловых потенциалов. Он пригоден к схемам, содержащим много ветвей, включенных параллельно. Для его применения требуется найти межузловое напряжение –  $U_{AB}$  (см. рис.1.1.13). Это напряжение равно:

$$U_{AB} = \frac{\sum_1^m \frac{E_j}{R_j}}{\sum_1^n \frac{1}{R_i}} = \frac{E_1 \cdot \frac{1}{R_1} - E_2 \cdot \frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}} = \frac{80 \frac{1}{6} - 64 \frac{1}{4}}{\frac{1}{6} + \frac{1}{4} + \frac{1}{(3+1)}} = \frac{160 - 192}{8} = -4B.$$

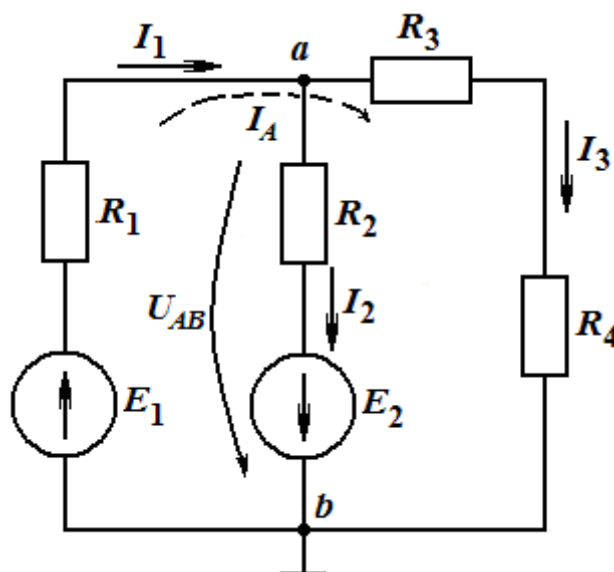


Рис. 1.1.13. Расчет цепи с использованием узла

Тогда токи в ветвях могут быть найдены по формуле

$$I_i = \frac{E_i + U_{AB}}{R_i},$$

где у э.д.с.  $E_i$  должны учитываться направления их действия. В данном примере токи в ветвях будут равны:

$$I_1 = (80 - (-4))/6 = 14 \text{ A}; I_2 = (-4 - E_2)/4 = -15 \text{ A}; \\ I_3 = U_{AB}/(R_3 + R_4) = -4 / 4 = -1 \text{ A}.$$

Общей особенностью рассмотренных методов является осуществление полного расчета цепи, т.е. нахождение токов во всех ее ветвях. Когда требуется определить ток только в одной ветви какой-либо ЭЦ, то прибегают к *методу эквивалентного генератора*, или *эквивалентного источника э.д.с.*, который основан на следующих рассуждениях.

5. *Метод эквивалентного генератора.*

В любой электрической цепи можно выделить какую-то одну ветвь, представив остальную часть схемы в виде двухполюсника (обобщенное название ветви или фрагмента схемы, которые двумя выходными зажимами (полюсами) присоединяется к выделенной ветви). Если у двухполюсника есть источник э.д.с. или тока, то он называется *активным*. В этом случае в двухполюснике ставят букву *A*. Если у двухполюсника нет источника э.д.с. или тока, то он называется пассивным. В этом случае в двухполюснике либо не ставится никакой буквы, либо ставится буква  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ .

По отношению к выделенной ветви двухполюсник оставшейся части цепи при расчете можно заменить эквивалентным генератором, э.д.с. которого равна напряжению холостого хода на зажимах выделенной ветви, а внутреннее сопротивление равно входному сопротивлению двухполюсника. При определении внутреннего сопротивления двухполюсника требуется мысленно «закоротить» имеющиеся в нем источники э.д.с., оставив только их внутренние сопротивления, если они имеются. Применим этот метод к расчету цепи по рис. 1.1.11. Сформулируем задачу.

Пусть требуется найти ток  $I_2$  в цепи по рис. 1.1.11 при тех же значениях параметров элементов схемы. На рис. 1.1.14 приведены три стадии преобразования схемы исследуемой цепи, необходимые для применения данного метода: стадия 1 отображает разрыв цепи в исследуемой ветви и получение режима «холостого хода» в ней. Стадия 2 – фиксирует процесс определения внутреннего сопротивления эквивалентного источника э.д.с., а стадия 3 – замену основной части ЭЦ эквивалентным источником с э.д.с.  $E_{\mathcal{E}} = U_{ABXX}$  и внутренним сопротивлением  $R_{\mathcal{E}}$  и процесс определения искомого тока.

Находим  $U_{ABXX}$  любым известным методом. Поскольку цепь в стадии 1 содержит только один источник, то можно воспользоваться соотношением:  $E_{\mathcal{E}} = U_{ABXX} = I_{11}(R_3 + R_4)$ . Напряжение  $U_{ABXX}$  равно:

$$U_{ABXX} = \frac{E_1(R_3 + R_4)}{R_1 + R_3 + R_4} = \frac{80}{10} \cdot 4 = 32 \text{ В.}$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного источника равно входному сопротивлению цепи при  $E_1 = 0$  (стадия 2), т.е.

$$R_{\mathcal{E}} = \frac{R_1(R_3 + R_4)}{R_1 + R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot 4}{10} = 2,4 \text{ Ом.}$$



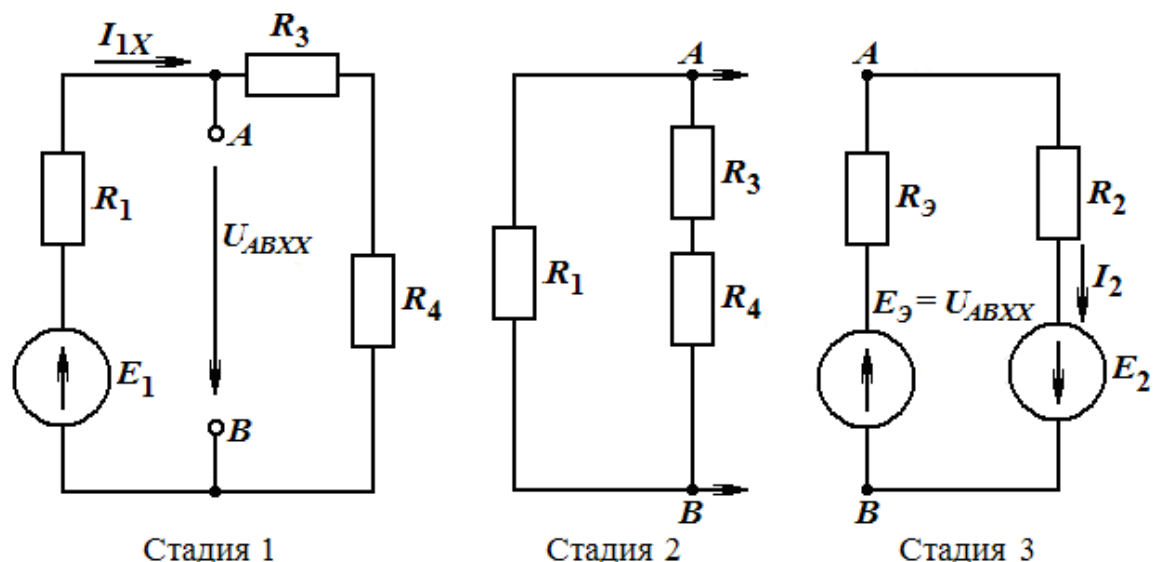


Рис. 1.1.14. Стадии преобразования схемы исследуемой цепи

Переходя к цепи в стадии 3 на рис. 1.1.14, можно найти искомый ток следующим образом:

$$I_2 = \frac{U_{ABXX} + E_2}{R_3 + R_2} = \frac{32 + 64}{2,4 + 4} = 15 \text{ A.}$$

Если требуется найти ток  $I_3$ , то  $E_3$  можно определить по методу 2-х узлов.

#### 6. Метод наложения.

Принцип наложения формулируется следующим образом: ток  $k$ -й ветви равен алгебраической сумме токов, вызываемой каждой из э.д.с. в отдельности. Этот принцип справедлив для всех линейных электрических цепей. Принцип наложения используется в методе наложения.

При расчёте по методу наложения поочередно рассчитывают токи, возникающие от действия каждой из э.д.с., мысленно удаляя остальные из схемы, но оставляя в схеме внутренние сопротивления источников, получают частичные токи, а затем находят токи в ветвях путём алгебраического сложения частичных токов.

#### Баланс мощности

Проверка расчетов электрических цепей постоянного тока осуществляется по балансу мощностей, который выражается в равенстве отдаваемой всеми источниками энергии мощности и мощности, потребляемой всеми резистивными элементами. Аналитически это можно записать так:

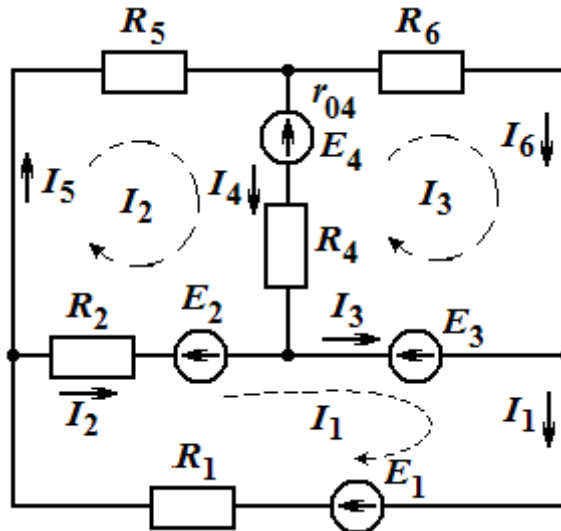
$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{i=1}^m I_i^2 R_i,$$

где  $n$  – количество источников э.д.с.;

$m$  – количество резистивных элементов.

Тренировочные задания к разделу

1. Найти токи в ЭЦ (см. рис. к задаче), если  $E_1 = 100$  В,  $E_2 = 30$  В,  $E_3 = 10$  В,  $E_4 = 6$  В,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 10$  Ом,  $R_4 = 6$  Ом,  $R_5 = 5$  Ом,  $R_6 = 15$  Ом,  $r_{04} = 1$  Ом.



Решение

Данная цепь содержит 6 ветвей, 4 узла и 3 контура. Если использовать метод законов Кирхгофа, то получим 6 уравнений, и определители будут сложны для ручных вычислений. В этом случае удачным будет применение метода контурных токов.

Выберем направления контурных токов, которые обозначены:  $I_1, I_2, I_3$ .

Составим систему уравнений для контуров по 2-му закону Кирхгофа:

$$E_1 - E_2 - E_3 = (R_1 + R_2) I_1 - R_3 I_2;$$

$$E_2 - E_4 = (R_2 + R_5 + r_{04} + R_4) I_2 + (r_{04} + R_4) I_3 - R_2 I_1; \quad (1.22)$$

$$E_3 - E_4 = (R_6 + r_{04} + R_4) I_3 + (r_{04} + R_4) I_2.$$

После подстановки числовых значений имеем:

$$60 = 20 I_1 - 10 I_2 ;$$

$$24 = -10 I_1 + 22 I_2 + 7 I_3;$$

$$16 = 7 I_2 + 22 I_3.$$

Решив эту систему уравнений, найдем контурные токи:

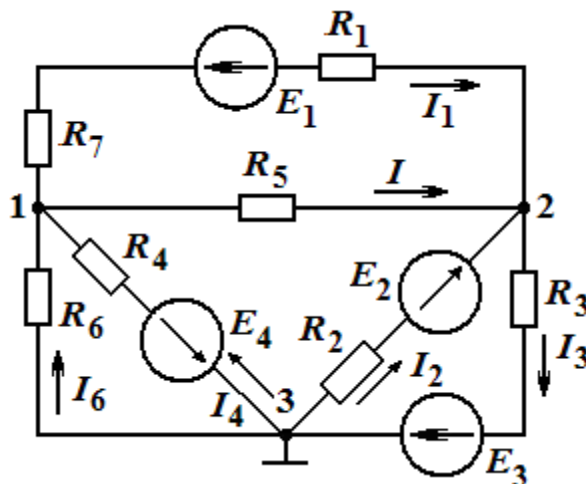
$$I_1 = 5 \text{ А}; I_2 = 4 \text{ А}; I_3 = -2 \text{ А}.$$

Затем находим истинные токи в ветвях. В ветви с  $E_1$  истинный ток  $I_1$  имеет направление контурного тока  $I_1$  и равен  $I_1 = I_1 = 5$  А. В ветви с  $R_5$ : ток равен 4 А. В ветви с  $R_6$  истинный ток  $I_6$  имеет направление, противоположное контурному току  $I_3$  и равен  $I_6 = -I_3 = 2$  А.

В ветви с  $R_2$  истинный ток  $I_2$  получится от наложения контурных токов  $I_1$  и  $I_2$ , и будет иметь направление большего из них, т.е.  $I_1$ . Он равен:  $I_2 = I_1 - I_2 = 5 - 4 = 1$  А. В ветви с  $R_4$  истинный ток  $I_4$  получится от наложения

контурных токов  $I_2$  и  $I_3$ , и будет иметь направление контурного тока  $I_2$ :  $I_4 = I_2 + I_3 = 4 + (-2) = 2$  А. В ветви с Э.Д.С.  $E_3$  истинный ток  $I_3$  получится от наложения контурных токов  $I_1$  и  $I_3$ , и будет иметь направление контурного тока  $I_1$ :  $I_3 = I_1 + I_3 = 5 + (-2) = 3$  А.

2. Для схемы (см. рис. к задаче), пользуясь методом узловых потенциалов, определить все токи. Дано:  $E_1 = 30$  В,  $E_2 = 10$  В,  $E_3 = 200$  В,  $E_4 = 56$  В,  $R_1 = 20$  Ом,  $R_2 = 30$  Ом,  $R_3 = 6$  Ом,  $R_4 = 8$  Ом,  $R_5 = 15$  Ом,  $R_6 = 40$  Ом и  $R_7 = 10$  Ом.



### Решение

1. Примем потенциал т.3 равным нулю ( $\varphi_3 = 0$ ). Тогда на основании (1.22) запишем систему уравнений для потенциалов т.т.1 и 2:

$$\varphi_1 g_{11} - \varphi_2 g_{12} = \sum_1 E \cdot g \quad (1)$$

$$-\varphi_1 g_{21} + \varphi_2 g_{22} = \sum_2 E \cdot g. \quad (2)$$

2. Подсчитаем  $g_{11}$  как сумму проводимостей ветвей, присоединенных к узлу 1:

$$g_{11} = \frac{1}{R_1 + R_7} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{30} + \frac{1}{15} + \frac{1}{8} + \frac{1}{40} = 0,25 \text{ См.}$$

$$g_{22} = \frac{1}{R_1 + R_7} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{30} + \frac{1}{15} + \frac{1}{30} + \frac{1}{6} = 0,3 \text{ См.}$$

3. Сумма проводимостей, соединяющих 1 и 2 узлы:

$$g_{12} = g_{21} = \frac{1}{R_1 + R_7} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{30} + \frac{1}{15} = 0,1 \text{ См.}$$

4. Подставим  $g_{11}$ ,  $g_{22}$ ,  $g_{12} = g_{21}$  в исходные выражения (1) и (2), получим:

$$0,25\varphi_1 - 0,1\varphi_2 = 30 \cdot (1/30) - 56 \cdot (1/8) = -6;$$

$$-0,1\varphi_1 + 0,3\varphi_2 = -30(1/30) + 10(1/30) - 200(1/8) = -34.$$

Решая их, получим:  $\varphi_1 = -80$  В,  $\varphi_2 = -140$  В.

5. Применяя обобщенный закон Ома (1.19), найдем искомые токи:

$$I_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - E_1}{R_1 + R_2} = \frac{-80 + 100 - 30}{30} = -1 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_2}{R_2} = \frac{140 + 10}{30} = 5 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3 + E_3}{R_3} = \frac{-140 + 200}{6} = 10 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 - E_4}{R_4} = \frac{80 - 56}{8} = 3 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_5} = \frac{-80 + 140}{15} = 4 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_6} = \frac{80}{40} = 2 \text{ А}.$$

Направления токов  $I_1 \dots I_6$  также указаны на рисунке.

3. Дано: мостовая измерительная цепь (см. рис. а к задаче), у которой:  $E = 120$  В,  $R_1 = 60$  Ом,  $R_2 = 15$  Ом,  $R_3 = 90$  Ом,  $R_4 = 60$  Ом,  $R_5 = 12$  Ом. Найти ток  $I_5$  в измерительной диагонали  $cd$ .

*Решение.*

Обозначим на схеме произвольное положительное направление искомого тока  $I_5$ . Часть схемы (внешнюю к исследуемой ветви) представим в виде некоторого генератора э.д.с.  $E_\Gamma$  (позиция б) с внутренним сопротивлением  $R_\Gamma$ . Направление  $E_\Gamma$  выбрано также произвольно. Тогда э.д.с.  $E_\Gamma$  определится напряжением холостого хода:  $E_\Gamma = U_{cdx.x} = (\varphi_c - \varphi_d)_{x.x}$ . На развернутой схеме генератора в режиме холостого хода (см. позицию в) обозначим токи в ветвях  $I_{0x.x}$ ,  $I_{1x.x}$ ,  $I_{3x.x}$ .

По закону Ома находим:

$$I_{1x.x} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{120}{75} = 1,6 \text{ А};$$

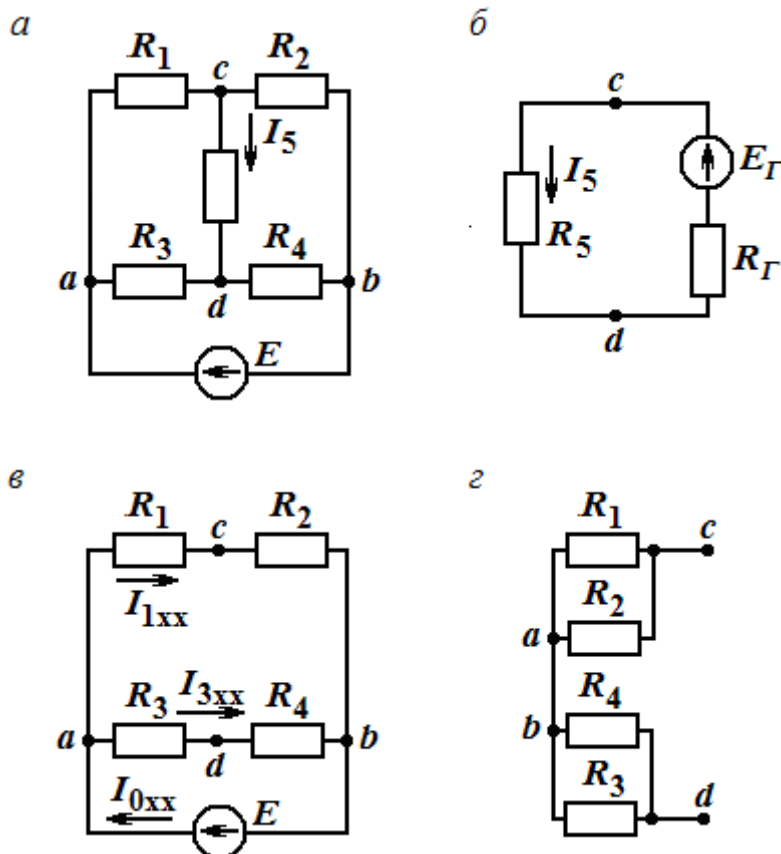
$$I_{3x.x} = \frac{E}{R_3 + R_4} = \frac{120}{150} = 0,8 \text{ А};$$

$$(\varphi_a - \varphi_c)_{x.x} = U_{acx.x} = R_1 \cdot I_{1x.x} = 60 \cdot 1,6 = 96 \text{ В};$$

$$(\varphi_a - \varphi_d)_{x.x} = U_{adx.x} = R_3 \cdot I_{3x.x} = 90 \cdot 0,8 = 72 \text{ В}.$$

Таким образом, э.д.с. эквивалентного генератора  $E_{\Gamma}$  равна:

$$\begin{aligned} E_{\Gamma} &= (\varphi_c - \varphi_d)_{X.X} = (\varphi_c - \varphi_a + \varphi_a - \varphi_d)_{X.X} = \\ &= (\varphi_a - \varphi_d)_{X.X} - (\varphi_a - \varphi_c)_{X.X} = 72 - 96 = -24 \text{ В.} \end{aligned}$$



Найдем сопротивление  $R_{\Gamma}$  эквивалентного генератора  $E_{\Gamma}$ . Заменяем в схеме (позиция в) источник напряжения короткозамкнутым участком и представим эту схему в виде позиции г. Тогда сопротивление  $R_{\Gamma}$  будет равно:

$$R_{\Gamma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{60 \cdot 15}{75} + \frac{90 \cdot 60}{150} = 48 \text{ Ом.}$$

Определяем искомый ток по закону Ома:

$$I_5 = E_{\Gamma} / (R_5 + R_{\Gamma}) = -24 / (48 + 12) = -0,4 \text{ А.}$$

Таким образом, ток в сопротивлении  $R_5$  течет от точки  $d$  к точке  $c$  и равен 0,4 А.

## ТЕСТЫ

1. Какое соотношение справедливо для первого закона Кирхгофа?

Укажите правильный ответ:

а)  $R = \frac{1}{g}$ ;

б)  $\sum_{k=1}^n I_k = 0$ ;

в)  $U = RI$ ;

г)  $I = gU$ .

2. С каким знаком должны суммироваться токи в первом законе Кирхгофа?

а) с одинаковыми;

б) с разными;

в) «+», если ток входит в узел;

г) «-», если ток выходит из узла.

3. Какое соотношение справедливо для второго закона Кирхгофа?

а)  $U = RI$ ;

б)  $\sum_{k=1}^n I_k = 0$ ;

в)  $\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k$ ;

г)  $I = gU$ .

4. Сколько нужно составить уравнений по первому закону Кирхгофа?

а)  $y$ ;

б)  $(y - 1)$ ;

в)  $\Delta P_T$ ;

г)  $(b - y)$ .

5. Сколько нужно составить уравнений по второму закону Кирхгофа?

а)  $(b - 1)$ ;

б)  $(b - y)$ ;

в)  $(b - y + b_{\text{ИТ}})$ ;

г)  $(b + y + 1)$ .

6. Чему равна контурная э.д.с. в методе контурных токов?

а)  $\sum_{k=1}^m E_k$ ;

б)  $\sum_{k=1}^n U_k$ ;

в)  $\sum_{k=1}^n I_k$ ;

г)  $\sum_{k=1}^n R_k I_k$ .

7. Чему равен узловый ток в методе узловых потенциалов?

а)  $\sum_{k=1}^m I_k$ ;

б)  $\sum_{k=1}^m g_k E_k$ ;

в)  $\sum_{k=1}^m R_k I_k$ ;

г)  $\sum_{k=1}^m R_k$ .

8. Три резистора по 90 Ом включены параллельно. Укажите правильный ответ для эквивалентного сопротивления:

а) 270 Ом;

б) 30 Ом;

в) 2700 Ом;

г) 90 Ом.

9. Смешанное сопротивление состоит из двух последовательных и четырех параллельных резисторов, с одинаковыми сопротивлениями по 100 Ом.

Укажите правильный ответ для общего сопротивления:

а) 500 Ом;

б) 200 Ом;

в) 225 Ом;

г) 300 Ом;

д) 400 Ом.

10. В каких единицах измеряется проводимость?

- а) Ом;                                      б) А;                                      в) Вт;  
г) Сим;                                      д) См.

11. Какой параметр цепи является общим для последовательного участка цепи?

- а) напряжение;                                      б) сопротивление;  
в) мощность;                                      г) ток.

12. Какой параметр цепи является общим для параллельного участка цепи?

- а) проводимость;                                      б) сопротивление;  
в) напряжение;                                      г) мощность.

## 1.2. Линейные однофазные электрические цепи переменного тока

### *Синусоидальные сигналы и их параметры*

Известно, что переменные напряжения и э.д.с. легко генерируются и преобразуются (трансформируются), а также передаются с меньшими потерями. Поэтому ЭЦ переменного тока получили большее распространение. В промышленности и энергетике используются однофазные и трехфазные электрические сети, в которых протекает синусоидальный ток. Синусоидальный сигнал – это сигнал, изменяющийся во времени по синусоидальному закону, например, ток:

$$i = I_m (\sin \omega t + \Psi_i),$$

где  $i$  – мгновенное (текущее) значение тока;

$I_m$  – амплитуда, максимальное значение тока;

$\Psi_i$  – начальная фаза;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота, которая измеряется в  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$  или  $\frac{1}{\text{с}}$ ;

$f$  – частота колебаний, причем  $f = 1/T$ , где  $T$  – период колебаний. На рис. 1.2.1 представлен график изменения  $i$ .

**Пример 1**

В выражении  $i = 70 \sin(314t + 60^\circ)$  А,

$$I_m = 70 \text{ А}, \quad \omega = 2\pi f = 314 \frac{1}{\text{с}}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{6,28} \frac{1}{\text{с}} = 50 \text{ Гц}, \quad \psi_i = 60^\circ.$$

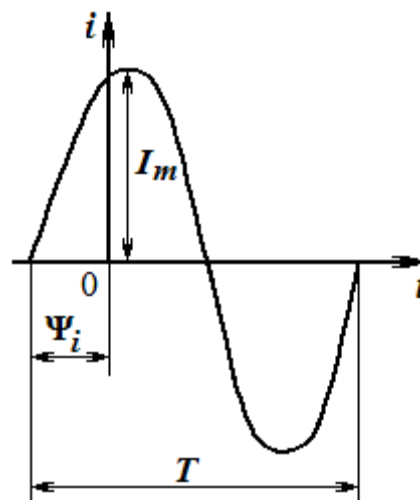


Рис. 1.2.1. График изменения текущего значения тока  $i$

Кроме мгновенного и амплитудного значений синусоидальные величины характеризуются также средним и действующим значениями. Под *средним значением* синусоидальной величины понимают значение её за половину периода:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{\omega T} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2I_m}{\pi} \cong 0,637 I_m.$$

Действующее ее значение равно:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \left[ \int_0^T \frac{1}{2} dt - \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt \right]} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} t} \Big|_0^T = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cong 0,707 I_m. \end{aligned}$$

### Свойства синусоидальных функций

Синусоидальные функции обладают следующими свойствами.

1. Суммирование (или вычитание) 2-х и более синусоидальных функций одной частоты дает синусоидальную функцию той же частоты:

$$\sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega t + \varphi_k) = A \sin(\omega t + \varphi).$$

2. Дифференцирование и интегрирование синусоидальных функций дает также синусоидальные функции той же частоты:

$$\frac{d}{dt} [A \sin(\omega t + \varphi)] = A\omega \cos(\omega t + \varphi) = A\omega \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\int A \sin(\omega t + \varphi) dt = -\frac{A}{\omega} \cos(\omega t + \varphi) = \frac{A}{\omega} \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right).$$

Из этих выражений видно, что операции, производимые линейными электрическими цепями, изменяют лишь амплитуду и начальную фазу синусоидальной функции. Следовательно, *цель* анализа работы и расчета цепей в установившемся синусоидальном режиме состоит в определении двух параметров: амплитуды и начальной фазы тока, напряжения или э.д.с. Для определения этих величин и понимания процессов, происходящих в ЭЦ переменного тока, применяют *метод комплексных амплитуд*, использующий алгебру комплексных чисел.



## Метод комплексных амплитуд

Этот метод основан на представлении синусоидальных функций через экспоненты с мнимым аргументом. Аналитически комплексное число можно представить в алгебраической, тригонометрической и показательной формах:

$$\dot{a} = a_1 + ja_2 = A \cos \alpha + jA \sin \alpha = Ae^{j\alpha},$$

где  $a_1, a_2$  – вещественная и мнимая составляющие;

$$I_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{\sum I^2 t}{\sum t}} = \sqrt{\frac{40^2 120 + 30^2 180 + 20^2 300}{120 + 180 + 300}} = 28 \text{ А.}$$

и  $\alpha$  – модуль и аргумент

комплексного числа, причем  $A = |a| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ ,  $\alpha = \arctg \frac{a_2}{a_1}$ .

Комплексное число  $\ddot{a}$ , отличающееся от  $\dot{a}$  только знаком аргумента или мнимой составляющей, называется *сопряженным*:

$$\ddot{a} = a_1 - ja_2 = A \cos \alpha - jA \sin \alpha = Ae^{-j\alpha}.$$

Для синусоидальной функции времени  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \Psi_u)$  амплитуда,  $A = U_m$  и аргумент  $\alpha = \omega t + \Psi_u$  линейно растут во времени. Таким образом,

$$a = Ae^{j\alpha} = U_m e^{j(\omega t + \Psi_u)} = U_m e^{j\omega t} = \dot{U}_m e^{j\omega t},$$

где  $\dot{U}_m = U_m e^{j\Psi_u}$  – комплексная амплитуда напряжения.

Модулем комплексной амплитуды является амплитуда синусоидальной функции, а аргументом – начальная фаза. На плоскости комплексная амплитуда  $\dot{U}_m$  изображается вектором, аргумент которого равен начальной фазе  $\varphi$ , а длина равна амплитуде  $U_m$ .

Второй множитель, экспонента,  $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$  имеет модуль, равный единице, и аргумент, линейно нарастающий во времени с угловой скоростью  $\omega$ . Геометрически она представляет собой единичный вектор, вращающийся с постоянной скоростью  $\omega$  против часовой стрелки. Комплексная величина  $\dot{U}_m$ , будучи умноженной, на  $e^{j\omega t}$ , приобретает свойства вращающегося вектора.

$$U_m e^{j(\omega t + \Psi_u)} = U_m \cos(\omega t + \Psi_u) + jU_m \sin(\omega t + \Psi_u).$$

$$U_m \cos(\omega t + \Psi_u) = \operatorname{Re} \left[ U_m e^{j(\omega t + \Psi_u)} \right],$$

$$U_m \sin(\omega t + \Psi_u) = \operatorname{Im} \left[ U_m e^{j(\omega t + \Psi_u)} \right].$$

Таким образом, синусоидально изменяющееся напряжение представляется мнимой частью  $U_m e^{j(\omega t + \Psi)}$ , т.е.  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \Psi_u)$ .

**Пример**

Пусть  $u = 10 \sin(\omega t + 60^\circ)$ . Требуется найти значение  $\dot{U}_m$ .

$$U_m = 10; \Psi_u = 60^\circ; \Rightarrow \dot{U}_m = 10e^{j60^\circ}.$$

Для перехода от комплексной амплитуды к мгновенному значению надо умножить  $\dot{U}_m$  на  $e^{j\omega t}$  и взять коэффициент при мнимой части от полученного произведения. Например:  $\dot{U}_m = 25e^{-j30^\circ}$ ,

$$u = \text{Im} \left[ 25e^{-j30^\circ} e^{j\omega t} \right] = \text{Im} \left[ 25e^{j(\omega t - 30^\circ)} \right] = 25 \sin(\omega t - 30^\circ).$$

Комплекс действующего значения (или просто комплекс) равен комплексной амплитуде, деленной на  $\sqrt{2}$ :

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}.$$

*Векторной диаграммой* называют совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающие синусоидальные функции времени одной и той же частоты и построенные с соблюдением правильной ориентации их относительно друг друга по фазе на момент времени  $t = 0$ . Диаграмма позволяет подтвердить операции сложения и вычитания синусоидальных функций (векторов).

Предположим, что необходимо сложить два тока ( $i_1$  и  $i_2$ ) одинаковой частоты (рис. 1.2.2). Сумма их дает некоторый ток той же частоты:  $i_1 + i_2$ , который равен диагонали параллелограмма со сторонами, равными исходным токам.

Разность заданных токов будет равна второй диагонали.

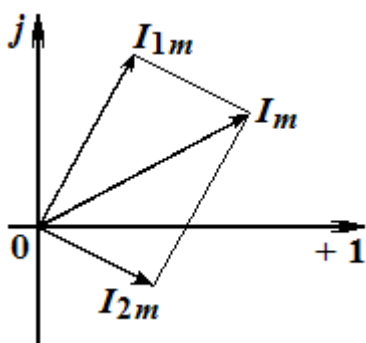


Рис. 1.2.2. Векторная диаграмма двух токов

$$i_1 = 30 \sin(\omega t + 60^\circ);$$

$$i_2 = 20 \sin(\omega t - 20^\circ);$$

$$I_{1m} = 30e^{j60^\circ};$$

$$I_{2m} = 20e^{j20^\circ};$$

$$I_m = I_{1m} + I_{2m}.$$

Умножение вектора на  $j$  и на  $-j$ . Пусть имеем вектор  $\dot{A} = Ae^{j\phi}$  (рис. 1.2.3).

Умножение его на  $j$  дает вектор, по модулю равный  $A$ , но повернутый в сторону опережения (против часовой стрелки) по отношению к исходному вектору  $\dot{A}$  на  $90^\circ$ . Умножение  $\dot{A}$  на  $(-j)$  поворачивает вектор  $\dot{A}$  на  $90^\circ$  в сторону отставания (по часовой стрелке) также без изменения его модуля. Представим векторы в показательной форме: т.к.  $j = 1 \cdot e^{j90^\circ} = e^{j90^\circ}$ ;  $-j = 1 \cdot e^{-j90^\circ} = e^{-j90^\circ}$ .

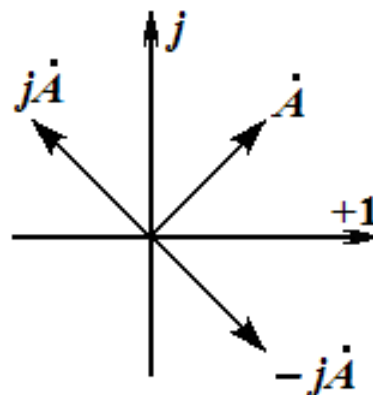


Рис. 1.2.3. Векторная диаграмма вектора  $\dot{A} = Ae^{j\phi}$

Тогда

$$A \cdot j = jAe^{j\alpha} = Ae^{j\alpha} \cdot e^{j90^\circ} = Ae^{j(\alpha+90^\circ)};$$

$$A(-j) = -jAe^{j\alpha} = Ae^{j\alpha} \cdot e^{-j90^\circ} = Ae^{j(\alpha-90^\circ)}.$$

Рассмотрим процессы, происходящие в электрической цепи с идеальными элементами. На рис. 1.2.4, а приведена цепь с идеальным резистором  $R$ , к которому подведено синусоидальное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ . По закону Ома через резистор потечет ток:

$$i_R = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t.$$

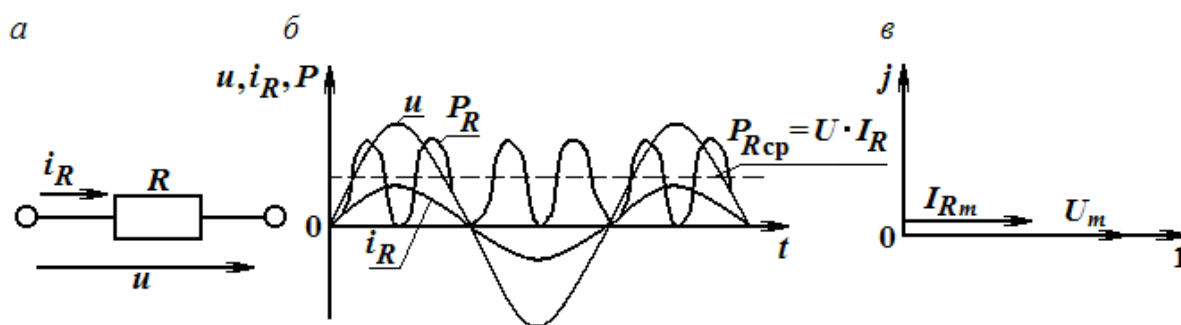


Рис. 1.2.4. Цепь с идеальным резистором (а), временные графики для цепи (б), векторная диаграмма цепи (в)

Следовательно, напряжение на идеальном резисторе и ток, проходящий через него, совпадают по фазе: они одновременно достигают своих амплитудных значений  $U_m$  и  $I_{Rm}$  и, соответственно, одновременно проходят через нуль (рис. 1.2.4, б).

Комплексная амплитуда напряжения  $\dot{U}_m$  и совпадающая с ней по фазе комплексная амплитуда тока  $\dot{I}_{Rm}$  показаны на векторной диаграмме рис. 1.2.4, в.

Мгновенная мощность, потребляемая резистором:

$$P_R = u \cdot i_R = U_m I_{Rm} \sin \omega t \cdot \sin \omega t = \frac{U_m I_{Rm} (1 - \cos 2\omega t)}{2} = U \cdot I_R (1 - \cos 2\omega t)$$

изменяется с удвоенной частотой по сравнению с частотой напряжения и тока и называется *активной*, т.к. расходуется на преобразование электро-энергии в тепло. Среднее значение активной мощности, потребляемой резистором, равно произведению действующих значений напряжения и тока (ее характер и значение приведены также на рис. 1.2.4, б). Рассмотрим процессы в идеальной катушке индуктивности.

Пусть через катушку с индуктивностью  $L$  (рис. 1.2.5, а) проходит ток  $i = I_m \sin \omega t$ . В ней возникнет магнитное поле, изменение которого вызовет появление Э.Д.С. индукции  $e_L = -L di/dt = -\omega L I_m \cos \omega t$ . Для компенсации ее на индуктивности появляется напряжение, которое равно:

$$u_L = -e_L = \omega \cdot L I_m \cos \omega t = \omega \cdot L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ);$$

где  $U_{Lm} = \omega \cdot L I_m$ .

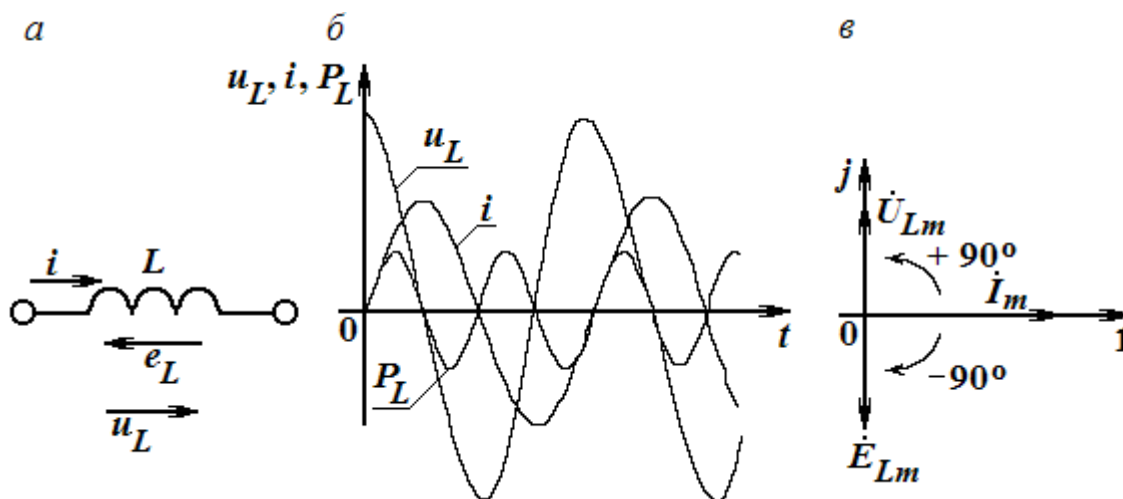


Рис. 1.2.5. Цепь с катушкой индуктивности (а), временные графики для цепи (б), векторная диаграмма цепи (в)

Произведение  $\omega L$  обозначают  $x_L$  и называют *индуктивным сопротивлением*:  $x_L = \omega L$ , т.к. оно измеряется в омах, т.е.  $[x_L] = [\omega] \cdot [L] = \text{с}^{-1} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Ом}$ .

Полное сопротивление идеальной катушки равно:

$$\bar{Z}_L = \frac{\dot{U}_{Lm}}{\dot{I}_m} = \frac{U_m \cdot e^{j(\omega t + 90^\circ)}}{I_m \cdot e^{j\omega t}} = j\omega L,$$

согласно правилу умножения комплексного числа на  $j$ .

Таким образом, катушка индуктивности оказывает переменному току сопротивление, модуль которого  $x_L = \omega L$  прямо пропорционален частоте. Кроме того, напряжение  $\dot{U}_{Lm}$  на индуктивности опережает ток  $\dot{I}_m$  по фазе на

$90^\circ$  (рис. 1.2.5, в). Вектор э.д.с. самоиндукции  $\dot{E}_{Lm}$  находится в противофазе с вектором напряжения  $\dot{U}_{Lm}$ . Временные диаграммы изменения тока, напряжения и мгновенной мощности, потребляемой катушкой, изображены на рис. 1.2.5, б. Из них видно, что мгновенная мощность катушки, равная

$$P_L = u_L \cdot i = U_{Lm} \cdot \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = (U_{Lm} \cdot I_m \cdot \sin 2\omega t) / 2 = U_L \cdot I \cdot \sin 2\omega t,$$

проходит через нулевое значение, когда через нуль проходит либо напряжение  $u_L$ , либо ток  $i$ , и изменяется по синусоидальному закону с удвоенной угловой частотой, имея амплитуду  $U_L \cdot I$ . Исходя из формулы мгновенной мощности, потребляемой идеальной катушкой, установлено, что ее среднее значение равно нулю.

Таким образом, идеальная катушка не потребляет энергию, а обменивается ею с источником. Переходим к изучению процессов в идеальном конденсаторе.

Пусть напряжение на идеальном конденсаторе (рис. 1.2.6, а) изменяется по закону:  $u = U_m \sin \omega t$ . Тогда по синусоидальному закону будет меняться и заряд  $q$  конденсатора  $q = C \cdot u = C \cdot \dot{U}_m \sin \omega t$  – и конденсатор будет периодически перезаряжаться. Периодическая перезарядка конденсатора сопровождается протеканием через него переменного тока:

$$i_C = C \cdot du/dt = C \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos \omega t = I_{Cm} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где  $I_m = C\omega U_m$ , который опережает приложенное напряжение на угол  $90^\circ$ . Полное сопротивление конденсатора равно

$$\bar{Z}_C = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{Cm}} = \frac{U_m e^{j\omega t}}{I_m e^{j(\omega t + 90^\circ)}} = -j \frac{1}{\omega C}.$$

Модуль этого сопротивления, т.е.  $x_C = \frac{1}{\omega C}$ , получил название *емкостного сопротивления*  $x_C$ .

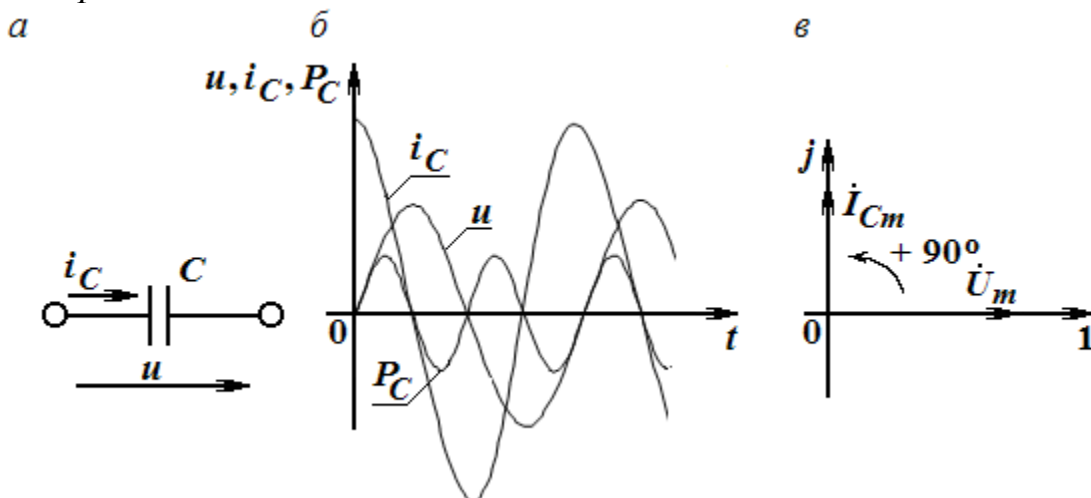


Рис. 1.2.6. Цепь с конденсатором (а), временные графики для цепи (б), векторная диаграмма цепи (в)

Оно также измеряется в омах и обратно пропорционально частоте. На рис. 1.2.6, б приведены временные диаграммы напряжения, тока через конденсатор и его мгновенной мощности. Последняя так же, как и в катушке индуктивности, не имеет среднего значения и колеблется с удвоенной частотой, т.е. идеальный конденсатор не потребляет электрической энергии, а обменивается ею с источником. На рис. 1.2.6, в приведена векторная диаграмма работы конденсатора в цепи переменного тока.

*Комплексные сопротивление и проводимость.  
Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме*

Комплексное сопротивление  $Z$  представляет собой отношение комплексных амплитуд напряжения и тока и является величиной, зависящей от параметров цепи и частоты приложенного сигнала:

$$Z = \frac{\dot{U}_m e^{j\alpha_u}}{\dot{I}_m e^{j\alpha_i}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\alpha_u - \alpha_i)} = z \cdot e^{j\varphi} = R + jx.$$

Модуль  $z = |Z|$  и аргумент сопротивления  $\varphi$  равны соответственно отношению вещественных амплитуд и разности начальных фаз напряжения и тока:

$$z = |Z| = \frac{U_m}{I_m}; \varphi = \alpha_u - \alpha_i.$$

Вещественную  $R$  и мнимую  $x$  части  $Z$  называют *активной* и *реактивной* составляющими комплексного сопротивления.

Величина  $Y$ , обратная комплексному сопротивлению, представляющая отношение комплексных амплитуд тока и напряжения, называется *комплексной проводимостью*:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_m} = \frac{I_m e^{j\alpha_i}}{U_m e^{j\alpha_u}} = y e^{j(\alpha_i - \alpha_u)} = y e^{-j\varphi} = g - jb,$$

где  $y = |Y|$  – модуль, а  $(-\varphi)$  – аргумент комплексной проводимости  $Y$ :

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}; \varphi = \arctg \frac{b}{g}.$$

Введение комплексных сопротивлений и проводимостей – коэффициентов пропорциональности между комплексными амплитудами напряжения и тока означает введение *закона Ома в комплексной форме* для установившихся синусоидальных режимов:  $\dot{U}_m = Z \cdot \dot{I}_m$ ;  $\dot{I}_m = Y \cdot \dot{U}_m$ .

**Пример**

Дано:  $R = 2$  Ом,  $X_L = 4$  Ом и  $X_C = 5$  Ом. Определить  $Z$ ,  $Y$  и  $\varphi$ .

### Решение

Находим  $Z = R + j(X_L - X_C) = 2 + j(4 - 5) = 2 - j$  Ом. Выразим  $Z$  в показательной форме:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{5} \text{ Ом}, \varphi = \arctg (X/R) = \arctg (-1/2) = -27^\circ.$$

Находим комплексную проводимость:

$$Y = \frac{1}{R - jX} = \frac{2}{(2 - j)(2 + j)} = \frac{2 + j}{5} = \frac{2}{5} + j\frac{1}{5} = (0,4 + j0,2) \text{ См},$$

где  $g = 0,4$  См и  $b = 0,2$  См,  $\varphi = \arctg (b/g) = \arctg (0,2/0,4) = 27^\circ$ .

Ответ:  $Z = 2 - j = \sqrt{5} \cdot e^{-j27^\circ}$  Ом и  $Y = \frac{1}{\sqrt{5}} e^{j27^\circ}$  См.

На рис. 1.2.7 на двух совмещенных комплексных плоскостях  $Z$  и  $Y$  приведены векторы, изображающие в определенном масштабе взаимно обратные комплексные сопротивление и проводимость с их составляющими, полученными в ходе расчета. Фигуры, которые они образуют, называются треугольниками сопротивлений и проводимостей.

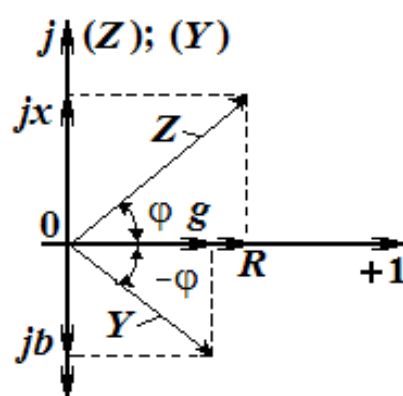


Рис. 1.2.7. Векторная диаграмма взаимно обратных комплексных сопротивлений

*Первый закон Кирхгофа* для электрических цепей переменного тока имеет следующий вид:  $\sum \dot{I}_{mk} = 0$  и устанавливает равенство нулю суммы комплексных амплитуд токов в ее узлах.

*Второй закон Кирхгофа* приобретает вид:  $\sum \dot{U}_{mk} = \sum \dot{E}_{mj}$  и устанавливает равенство суммы комплексных амплитуд э.д.с. сумме комплексных амплитуд падений напряжений на элементах контура.

### Последовательное соединение активного и индуктивного элементов

На рис. 1.2.8, а приведена схема активно-индуктивного потребителя энергии от источника Э.Д.С. с комплексной амплитудой  $\dot{E}_m = E_m e^{j\Psi_u}$ .

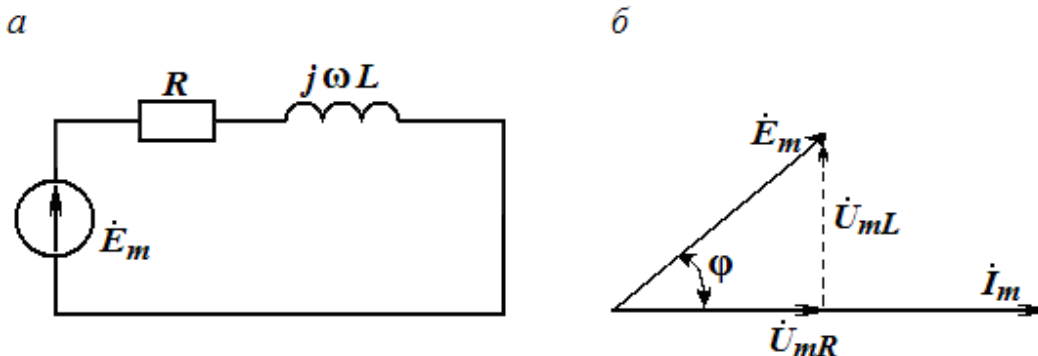


Рис. 1.2.8. Схема активно-индуктивного потребителя электрической энергии (а), векторная диаграмма цепи (б)

По 2-му закону Кирхгофа в комплексной форме можно записать для данной цепи:

$$\dot{E}_m = \dot{U}_{mR} + \dot{U}_{mL} = R\dot{I}_m + j\omega LI_m = (R + j\omega L)I_m = ZI_m.$$

Модуль и аргумент комплексного сопротивления  $|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ;  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$  определяют, соответственно, соотношение между амплитудами и *сдвиг по фазе*  $\varphi$  между напряжением и током.

Искомая комплексная амплитуда тока:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{R + j\omega L} = \frac{\dot{E}_m e^{j\Psi_u}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cdot e^{j \arctg \frac{\omega L}{R}}} = I_m e^{j\left(\Psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R}\right)}.$$

Таким образом, мгновенное значение установившегося тока в цепи равно:  $i(t) = I_m \sin\left(\omega t + \Psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R}\right)$ . Отсюда вытекает, что ток отстает по фазе от э.д.с. на угол  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ , зависящий от соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями цепи. Напряжение на активном сопротивлении будет совпадать по фазе с током, а напряжение на индуктивном сопротивлении – опережать по фазе ток на  $90^\circ$ , поскольку комплексы этих напряжений имеют вид:  $\dot{U}_{mR} = R \cdot \dot{I}_m$ ;  $\dot{U}_{mL} = j\omega L \dot{I}_m = \omega L I_m e^{j(\Psi_i + 90^\circ)}$ . Полученные комплексные равенства можно изобразить на векторной диаграмме (рис. 1.2.8, б).

Аналогично рассматриваются цепи с последовательным соединением  $RC$ - и с  $RLC$ -элементов. Параллельное соединение  $RL$ -,  $RC$ - и  $RLC$ -элементов анализируется с использованием комплексных проводимостей.

### *Цепи с $RLC$ -элементами и явление резонанса*

Реактивные сопротивления и проводимости отдельных участков цепи могут быть как положительными, так и отрицательными величинами и, следовательно, могут взаимно компенсироваться. Поэтому возможны случаи, когда, несмотря на наличие в цепи индуктивных катушек и конденсаторов, входные реактивные сопротивления или входная реактивная проводимость всей цепи оказываются равными нулю. При этом ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе, и эквивалентное сопротивление всей цепи будет активным. Такое явление называют *резонансным*. Рассмотрим это явление.

а) Последовательное соединение  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -элементов и резонанс напряжений.



Комплексное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных участков  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (рис. 1.2.9, *a*) определяется как

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L + \frac{1}{\omega C}\right) = R + jx = z \cdot e^{j\phi},$$

где  $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ ;  $z = \sqrt{R^2 + x^2}$ ;  $\phi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ .

Резонанс имеет место при  $\phi = 0$ , что равносильно условию  $x = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ , т.е.  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  или  $\omega^2 LC = 1$ . Его можно достичь, изменяя частоту приложенного к цепи напряжения, либо индуктивность катушки или емкость конденсатора. При этом значения угловой частоты, индуктивности и емкости, при которых наступает резонанс, определяется формулами:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

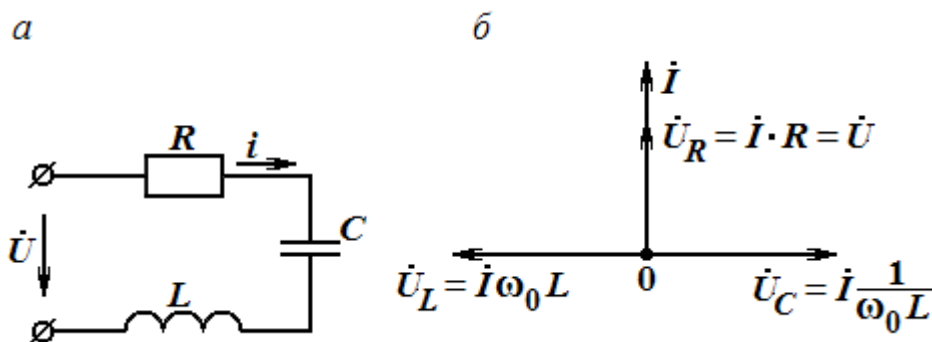


Рис. 1.2.9. Последовательная  $RLC$ -цепь (*a*), векторная диаграмма цепи (*б*)

Частоту  $\omega_0$  называют резонансной частотой. Если напряжение  $U$  на зажимах цепи и активное сопротивление  $R$  цепи не изменяются, то ток в рассматриваемой цепи при резонансе имеет наибольшее значение, равное  $\frac{U}{R}$ , не зависящее от значений реактивных сопротивлений. Векторная диаграмма в случае резонанса приведена на рис. 1.2.9, *б*. Если реактивные сопротивления  $x_L = x_C$  при резонансе превосходят по значению активное сопротивление  $R$ , то напряжение на зажимах индуктивной катушки или конденсатора могут превосходить, и иногда весьма значительно, напряжение на зажимах цепи. Поэтому резонанс при последовательном соединении называют *резонансом напряжений*.

Превышение напряжения на реактивных элементах цепи над напряжением на зажимах цепи имеет место при условии  $R < \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$ .

Величина  $\sqrt{\frac{L}{C}}$ , имеющая размерность сопротивления и обозначенная через  $\rho$ , носит название *волнового сопротивления контура*. Отношение

$$Q = \frac{U_{C_0}}{U} = \frac{U_{L_0}}{U} = \frac{I_0 \omega_0 L}{I_0 R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\rho}{R}$$

определяет кратность превышения напряжения на зажимах индуктивного и емкостного сопротивлений над напряжением на зажимах всей цепи. Величину  $Q$ , определяющую резонансные свойства контура, называют *добротностью* контура. Принято также резонансные свойства характеризовать величиной  $d = \frac{1}{Q}$ , которая называется *затуханием* контура. На

рис. 1.2.10 приведены зависимости падений напряжений на всех элементах цепи и тока от частоты.

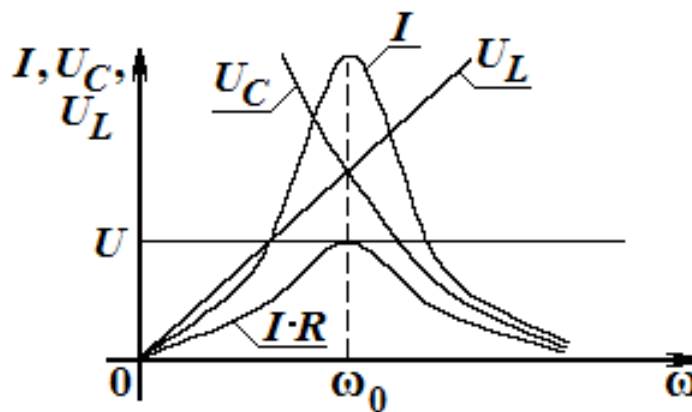


Рис. 1.2.10. Зависимости падений напряжений на элементах цепи и тока от частоты

Частотная характеристика  $I(\omega)$  при  $U=\text{const}$ ,  $R=\text{const}$ ,  $L=\text{const}$  и  $C=\text{const}$  выражается формулой  $I(\omega) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$  и имеет колоколо-

образный вид, острота которого определяется добротностью контура.

При  $\omega=0$  будем иметь  $I=0$ , так как конденсатор не пропускает постоянный ток, и всё поступающее напряжение прикладывается к конденсатору ( $U_C=U$ ). При  $\omega = \infty$  также имеем  $I=0$ , так как сопротивление катушки бесконечно и все напряжение прикладывается к катушке ( $U_L=U$ ).

При частоте резонанса  $\omega = \omega_0$  имеем  $U_L = U_C$ , и так как напряжение на катушке и на конденсаторе взаимно компенсируются, то все напряжение приходится на участок с сопротивлением  $R$  ( $U_R = I \cdot R = U$ ).

Диаграмма на рис. 1.2.11,б приведена для случая  $d < 1$ , вследствие чего при частоте резонанса  $U_C = U_L > U$ . Максимум  $U_C$  наступает при частоте, меньшей  $\omega_0$ , т.е. раньше максимума  $I$ , так как для получения величины  $U_C$  необходимо умножить ток  $I$  на убывающую величину  $\frac{1}{\omega C}$ . Максимум же  $U_L$  достигается при частоте, превышающей  $\omega_0$ , т.е. позже максимума  $I$ , так как для получения величины  $U_L$  необходимо умножить ток на возрастающую величину  $\omega L$ .

Кривые, выражающие зависимость величин  $I$ ,  $U_L$  и  $U_C$  от частоты, дающие графическое изображение частотных характеристик цепи, называют также резонансными кривыми.

б) Параллельное соединение  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -элементов и резонанс токов.

Условием резонанса при параллельном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений (рис. 1.2.11, а) является равенство реактивных проводимостей, при котором будет также наблюдаться отсутствие сдвига фаз между током и напряжением на зажимах цепи.

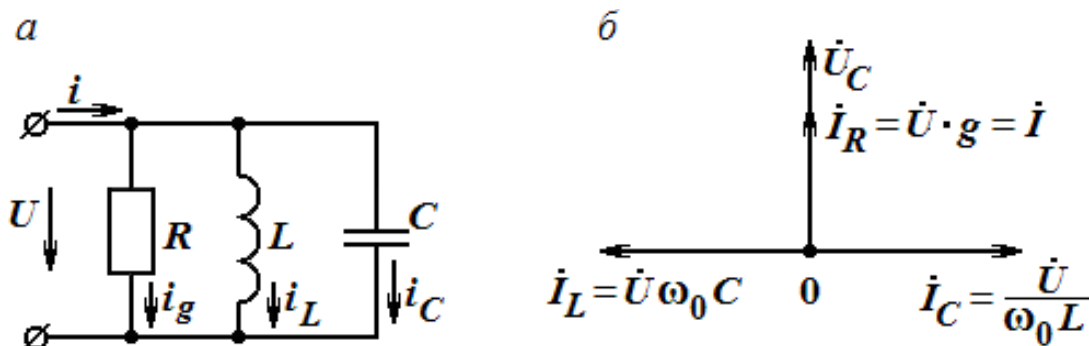


Рис. 1.2.11. Параллельная  $RLC$ -цепь (а), векторная диаграмма цепи (б)

Поскольку  $Y = g - jb = y \cdot e^{-j\varphi}$ ,

$$\text{где } y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_C - b_L}{g} = \arctg \frac{-b}{g},$$

то условие  $\varphi = 0$  означает, что  $b = b_L - b_C = 0$  или  $\frac{1}{\omega L} - \omega C = 0$ ;  $\omega^2 LC = 1$ .

Таким образом, взаимная компенсация реактивных проводимостей, при которой наступает резонанс в данной цепи, имеет место при тех же соотношениях между параметрами элементов схемы:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

При резонансе реактивная проводимость цепи равна нулю и полная проводимость цепи достигает минимального значения. Поэтому ток в общей ветви  $I = U \cdot y$  при неизменном напряжении оказывается наименьшим в отличие от резонанса при последовательном соединении, когда ток, наоборот, имел максимальное значение. Векторная диаграмма при резонансе в рассматриваемой цепи приведена на рис. 1.2.11, б.

Так как вектор тока в общей ветви оказывается геометрической суммой векторов трех токов, два из которых  $\dot{I}_L$  и  $\dot{I}_C$  находятся в противофазе, то при резонансе возможны случаи, когда токи в индуктивной катушке и в конденсаторе могут превосходить, и иногда намного, суммарный ток в цепи. Поэтому резонанс при параллельном соединении называют *резонансом токов*.

Превышение токов в реактивных элементах цепи над суммарным током цепи имеет место при условии  $g < \omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L} = \sqrt{\frac{C}{L}} = \gamma$ . Величина  $\sqrt{\frac{C}{L}}$ , имеющая размерность проводимости и обозначенная через  $\gamma$ , носит название *волновой проводимости* контура. Графики изменения общего тока и токов в ветвях в зависимости от частоты приведены на рис. 1.2.12.

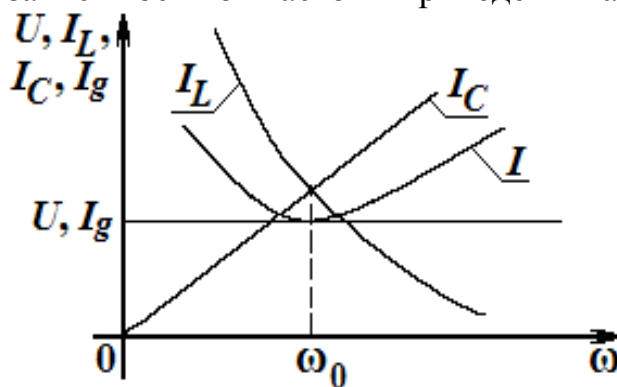


Рис. 1.2.12. Зависимость общего тока (а) и токов в ветвях (б) от частоты

### Мощность в цепях переменного тока

Мощность в электрических цепях переменного тока подразделяется на активную, реактивную и полную. Под *активной мощностью*  $P$  понимают среднее значение мгновенной мощности  $p$  за период  $T$ .

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i dt.$$

Если ток  $I = I_m \sin \omega t$ , а напряжение на участке цепи  $u = U_m \sin(\omega t + \phi)$ , то:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \phi) dt = \frac{U_m I_m}{2} \cos \phi = UI \cos \phi.$$

Активная мощность физически представляет энергию, которая выделяется в единицу времени в виде тепла на участке цепи с сопротивлением  $R$ . Действительно, произведение  $U \cdot \cos \phi = IR$ . Следовательно,  $P = U \cos \phi \cdot I = I^2 R$ .

Единица измерения активной мощности –  $Вт$ .

Под *реактивной мощностью*  $Q$  понимают произведение напряжения  $U$  на участке цепи на ток  $I$  по этому участку и на синус угла  $\phi$  между напряжением  $U$  и током  $I$ :

$$Q = UI \sin \phi.$$

Единица реактивной мощности – вольт-ампер реактивный ( $ВАр$ ). Если  $\sin \phi > 0$ , то  $Q > 0$ , если  $\sin \phi < 0$ , то  $Q < 0$ .

Полная мощность

$$S = UI.$$

Единица полной мощности –  $ВА$ .

Мощности  $P$ ,  $Q$  и  $S$  связаны следующей зависимостью:

$$P^2 + Q^2 = S^2.$$

Графически эту связь можно представить в виде прямоугольника (рис. 1.2.18) – треугольника мощностей, у которого имеется катет, равный  $P$ , катет, равный  $Q$  и гипотенуза  $S$ .

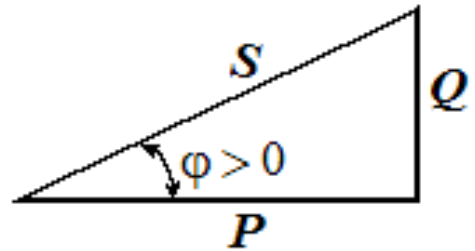


Рис. 1.2.18. Векторная диаграмма для мощностей в цепи

### Выражение мощности в комплексной форме записи

Пусть задан некоторый комплекс:

$$\dot{A} = Ae^{j\phi} = A \cos \phi + jA \sin \phi.$$

Под комплексом  $\dot{A}^*$ , сопряженным с комплексом  $\dot{A}$ , будем понимать комплекс  $A = Ae^{-j\phi} = A \cos \phi - jA \sin \phi$ .

Рассмотрим простой прием определения активной и реактивной мощностей через комплекс напряжения и сопряженный комплекс тока. Напряжение на некотором участке  $\dot{U} = Ue^{j\phi_u}$ , ток по этому участку  $\dot{I} = Ie^{j\phi_i}$ .

Угол между напряжением и током  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ . Умножим комплекс напряжения на сопряженный комплекс тока  $I = Ie^{-j\varphi_i}$  и обозначим полученный комплекс через  $\tilde{S}$ :

$$\tilde{S} = \dot{U} I^* = UIe^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ.$$

Значок  $\sim$  (тильда) над  $S$  обозначает комплекс полной мощности, составленный при участии сопряженного комплекса  $I$ . Таким образом, активная мощность  $P$  есть действительная часть ( $Re$ ), а реактивная мощность  $Q$  – мнимая часть ( $I_m$ ) произведения  $\dot{U} I^*$ :

$$P = \operatorname{Re} \left[ \dot{U} I^* \right]; \quad Q = I_m \left[ \dot{U} I^* \right].$$

### *Проверка результатов расчета цепей переменного тока*

Из закона сохранения энергии следует, что в любой линейной электрической цепи соблюдается баланс активных и реактивных мощностей. Это означает, что активная мощность, генерируемая источником, равна активной мощности, потребляемой всеми приемниками. В свою очередь, сумма отдаваемых источником реактивных мощностей равна сумме потребляемых реактивных мощностей. Отсюда следует, что правильность расчета цепей переменного тока можно установить по результатам оценки комплексных мощностей источников и приемников. Следует всегда помнить, что реактивные мощности могут быть как положительными, так и отрицательными.

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Фазовый сдвиг  $\varphi$  между напряжением на индуктивной катушке и током  $i = 7 \sin(628t + 45^\circ)$  равен  $30^\circ$ , при этом активная мощность  $P = 160$  Вт. Определить полное, активное и реактивное сопротивления катушки, ее индуктивность, полную и реактивную мощности. Записать выражение для мгновенных значений напряжения на катушке, на ее активном и индуктивном сопротивлении. Построить векторную диаграмму для момента времени  $t = 0$ .

*Решение*

Действующее значение напряжения на катушке:

$$U = \frac{P}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{160}{\frac{7}{\sqrt{2}} \cdot 0,866} = 37,2 \text{ В.}$$

Полное сопротивление катушки:  $Z = \frac{U}{I} = \frac{37,2}{7\sqrt{2}} = 7,5 \text{ Ом.}$

Индуктивное сопротивление катушки:  $X_L = Z \cdot \sin \phi = 7,5 \cdot 0,5 = 3,75 \text{ Ом.}$

Активное сопротивление катушки:

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} = Z \cdot \cos \phi = 7,5 \cdot 0,866 = 6,5 \text{ Ом.}$$

Индуктивность катушки:  $L = X_L / \omega = 3,75 / 628 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 6 \text{ мГн.}$

Полная мощность:  $S = U \cdot I = 37,2 \cdot 7 / \sqrt{2} = 185 \text{ В} \cdot \text{А.}$

Реактивная мощность:  $Q = \sqrt{S^2 - P^2} = U \cdot I \cdot \sin \phi = 92,5 \text{ ВАр.}$

Выражения для мгновенных значений напряжений:

а) на катушке:  $U_m = U\sqrt{2} = 37,2\sqrt{2} = 52,5 \text{ В, } \Psi_u = \Psi_i + 30^\circ = 45^\circ + 30^\circ = 75^\circ;$   
тогда  $u = 52,5 \sin(628t + 75^\circ) \text{ В;}$

б) на активном сопротивлении:  $u_R = U_{Rm} \sin(628t + 45^\circ);$

$$U_{Rm} = U_R \sqrt{2} = I_m R = 7 \cdot 6,5 = 45,5 \text{ В,}$$

Тогда  $u_R = 45,5 \sin(628t + 45^\circ) \text{ В;}$

в) на индуктивном сопротивлении катушки:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 628 \cdot 7 \cdot \cos(628t + 135^\circ) \text{ В.}$$

Для построения векторной диаграммы определяем действующие значения:

$$U_R = I \cdot R = 7\sqrt{2} \cdot 6,5 = 32,2 \text{ В, } U_L = I \cdot X_L = 7\sqrt{2} \cdot 3,75 = 18,6 \text{ В}$$

и выбираем масштаб по напряжению и току. Затем по горизонтали откладываем положительное направление оси абсцисс и строим под углом  $45^\circ$  к ней вектор тока. По направлению этого вектора откладываем в масштабе вектор напряжения  $U_R$ . Вектор напряжения  $U_L$  откладываем под углом  $90^\circ$  в сторону опережения вектора тока  $I$ . Складывая эти векторы, получим в выбранном масштабе вектор напряжения  $U$ , приложенного к катушке (см. рис. 1.2.19).

2. По цепи, состоящей из последовательно соединенных индуктивной катушки, полное сопротивление которой составляет  $30,5 \text{ Ом}$ , и конденсатора емкостью  $4,8 \text{ мкФ}$ , проходит ток  $i = 2,7 \sin(3454t + 40^\circ) \text{ А}$ , активная мощность этой цепи  $P = 35,7 \text{ Вт}$ .

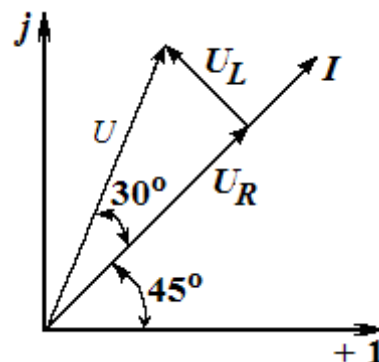


Рис. 1.2.19. Векторная диаграмма для задачи 1

Определить индуктивность катушки, ее активное сопротивление, полное сопротивление цепи, действующее значение приложенного напряжения на входе, полную и реактивную мощности цепи. Определить частоту, при которой в цепи наступит резонанс напряжений, ее полное сопротивление и действующее значение тока в цепи. Определить полную, активную и реактивную мощности цепи при резонансе, записать выражение для мгновенного значения входного напряжения до резонанса и в момент резонанса. Построить векторную диаграмму для 2-х указанных режимов работы цепи при  $t = 0$ .

*Решение*

Активное сопротивление катушки:

$$R_K = \frac{P}{I^2} = \frac{P}{(I_m \sqrt{2})^2} = 35,7 \frac{2}{2,7^2} = 9,8 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление катушки:

$$X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{30,5^2 - 9,8^2} = 29 \text{ Ом.}$$

Индуктивность катушки:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{29}{3454} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Так как  $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{3454 \cdot 4,8 \cdot 10^{-6}} = 69,3 \text{ Ом}$ , то полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R_K^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(9,8)^2 + (31,3)^2} = 32,8 \text{ Ом.}$$

Действующее значение напряжения на входе:

$$U_{\text{вх}} = I \cdot Z = \frac{I_m}{\sqrt{2}} Z = \frac{2,7}{\sqrt{2}} \cdot 32,8 = 62,6 \text{ В.}$$

Реактивная мощность цепи:

$$Q = I^2 (X_L - X_C) = \left( \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot (X_L - X_C) = - \left( \frac{2,7}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 31,3 = -113,9 \text{ ВАр.}$$

Полная мощность цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{35,7^2 + 113,9^2} = 119,5 \text{ ВА,}$$

или  $S = U_{\text{вх}} I = U_{\text{вх}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 62,6 \frac{2,7}{\sqrt{2}} = 119,5 \text{ ВА.}$

Частота при резонансе:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{8,4 \cdot 10^{-3} \cdot 4,8 \cdot 10^{-6}}} = 796 \text{ Гц.}$$



Полное сопротивление цепи в момент резонанса:

$$Z = R_K, \text{ т.к. } X_L = X_C, Z = 9,8 \text{ Ом.}$$

Действующее значение тока в цепи при резонансе:

$$I_{PEZ} = \frac{U_{BX}}{Z} = \frac{62,6}{9,8} = 6,39 \text{ А.}$$

Активная мощность при резонансе:  $P = I^2 R_K = 6,39^2 \cdot 9,8 = 400 \text{ Вт}$  равна полной мощности:  $S = U_{BX} \cdot I_{PEZ} = 62,6 \cdot 6,39 = 400 \text{ ВА.}$

Реактивная мощность цепи  $Q = 0$ .

Мгновенное значение  $U_{BX}$  до резонанса:

$$u_{BX} = U_{BX} \sqrt{2} \sin(\omega t + \Psi_u) \text{ В, } \Psi_u = \Psi_i + \phi,$$

$$\text{где } \Psi_i = 40^\circ, \quad \phi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R_K} = \arctg \frac{29 - 60,3}{9,8} = \arctg(-3,193) \approx -73^\circ.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Psi_u &= 40^\circ - 73^\circ = -33^\circ \text{ и } u_{BX} = 62,2\sqrt{2} \sin(3454t - 33^\circ) = \\ &= 88,3 \sin(3454t - 33^\circ) \text{ В.} \end{aligned}$$

При резонансе  $\phi = 0$  и  $\psi U = \psi I$ , тогда  $u_{BX} = 88,3 \sin(\omega_0 t + \Psi_u)$ ,

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 796 = 5000 \text{ с}^{-1} \quad \text{и} \quad u_{BX} = 88,3 \sin(5000t + 40^\circ) \text{ В.}$$

Для построения векторных диаграмм для 2-х режимов работы цепи необходимо определить действующие значения напряжений  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  до резонанса и в момент резонанса:

а) до резонанса

$$U_R = IR_K = \left(\frac{2,7}{\sqrt{2}}\right) \cdot 9,8 = 18,8 \text{ В, } U_L = IX_L = \left(\frac{2,7}{\sqrt{2}}\right) \cdot 29 = 55,5 \text{ В,}$$

$$U_C = IX_C = \left(\frac{2,7}{\sqrt{2}}\right) \cdot 60,3 = 116 \text{ В.}$$

б) в момент резонанса

$$U_R = I_{PEZ} R_K = 6,39 \cdot 9,8 = 63 \text{ В, } U_L = I_{PEZ} X_L = U_C = I_{PEZ} X_C,$$

$$X_L = \omega_0 L = f_0 2\pi L = 2 \cdot 3,14796 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3} = 42 \text{ Ом, } U_L = U_C = 6,39 \cdot 42 = 278 \text{ В.}$$

Векторные диаграммы напряжений и тока к задаче 2 приведены на рис. 1.2.20.



5. Напряжение в цепи, составленной из последовательно соединённых сопротивлений и индуктивности, определяется по закону  $u = U_m \sin \omega t$ . В каком из выражений допущена ошибка:

- а)  $x_L = \omega L$ ;                      б)  $Z = \sqrt{R^2 + x_L^2}$ ;                      в)  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{x_L}$ ;  
 г)  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ ;                      д)  $I_m = \frac{U_m}{Z}$ .

6. Напряжение в цепи, составленной из последовательно соединённых сопротивлений и конденсатора, определяется по закону  $u = U_m \sin \omega t$ . В каком из выражений допущена ошибка:

- а)  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ ;                      б)  $Z = \sqrt{R^2 + x_C^2}$ ;                      в)  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{x_C}$ ;  
 г)  $I_m = \frac{U_m}{Z}$ ;                      д)  $x_C = \frac{1}{\omega C}$ .

7. Цепь из последовательно соединённых  $R, L, C$  имеет сопротивления  $R=20$  Ом;  $x_L=40$  Ом;  $x_C=20$  Ом. Указать правильный ответ модуля комплексного сопротивления  $Z$ :

- а) 80 Ом;                      б) 40 Ом;                      в)  $20\sqrt{2}$  Ом;  
 г) 50 Ом;                      д) 20 Ом.

8. Какая из приведённых формул для определения мощности содержит ошибку:

- а)  $S = UI$ ;                      б)  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ;  
 в)  $Q = I^2 x$ ;                      г)  $Q = UI \cos \varphi$ .

9. Какое из приведенных выражений для цепи синусоидального тока, содержащих последовательно соединённые  $R, L, C$ , содержит ошибку:

- а)  $Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}$ ;                      б)  $g = \frac{R}{Z}$ ;                      в)  $x_C = \frac{1}{\omega C}$ ;  
 г)  $\varphi = \frac{x}{Z^2}$ ;                      д)  $x_L = \omega L$ .

10. В цепи из последовательно соединённых  $R$  и  $L$  указать, как ориентировано напряжение на индуктивности относительно тока:

- а) опережает на  $90^\circ$ ;                      б) совпадает;                      в) отстает на угол  $\varphi$ ;  
 г) отстает на  $90^\circ$ ;                      д) опережает на угол  $\varphi$ .

### 1.3. Трехфазные цепи синусоидального тока

#### *Элементы трехфазных электрических цепей*

Трехфазные электрические цепи считаются частным случаем многофазных цепей и представляют собой совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют э.д.с. одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$  и создаваемые общим источником энергии. Отдельную однофазную цепь называют фазой, и трехфазная цепь считается симметричной, если сопротивления нагрузок всех ее фаз равны и имеют одинаковый характер. Трехфазная система э.д.с. может быть создана с помощью синхронной электрической машины, в статоре которой на равном расстоянии уложены три одинаковые обмотки в виде катушек, а ротор выполнен в виде постоянного магнита. Тогда при вращении ротора с постоянной угловой скоростью в обмотках статора будут наводиться переменные э.д.с. одинаковой амплитуды, сдвинутые друг относительно друга на угол  $120^\circ$ .

$$\begin{aligned}e_A &= E_m \sin \omega t = \dot{E}; \\e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \dot{E} \cdot e^{-j120^\circ}; \\e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) = \dot{E} \cdot e^{j120^\circ}.\end{aligned}\tag{1.3}$$

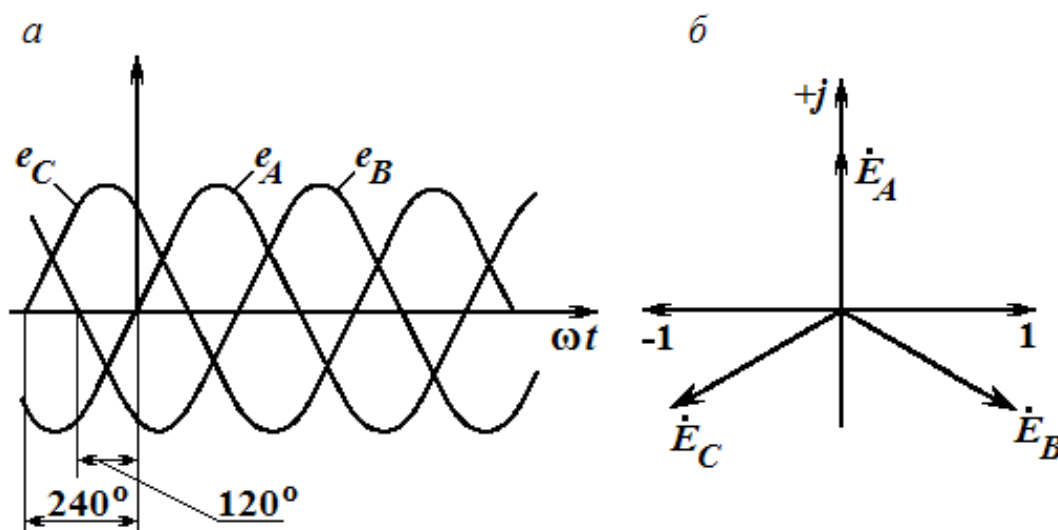


Рис. 1.3.1. Временные графики Э.Д.С. для трехфазной цепи (а), векторная диаграмма для цепи (б)

Графики их мгновенных значений изображены на рис. 1.3.1, а, который называется временной диаграммой, а векторная диаграмма – на рис. 1.3.1, б, где приведена часть комплексной плоскости. Из рис. 1.3.1 видно, что сумма

мгновенных значений всех э.д.с. или геометрическая сумма их векторов всегда равна нулю, т.е.

$$e_A + e_B + e_C = 0 \text{ и } \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (1.3.2)$$

Под трехфазной электрической цепью понимают совокупность трехфазного источника э.д.с. (генератора), трехфазной нагрузки (приемника) и соединительных проводов. На эквивалентной схеме трехфазных цепей каждую из фаз генератора принято изображать источниками э.д.с.  $E_A, E_B, E_C$ .

Иногда последовательно с ними включают внутренние сопротивления обмоток генератора  $r_{0A}, r_{0B}, r_{0C}$ , соответственно.

Если фазы обмотки генератора электрически не соединены между собой, то они образуют несвязанную трехфазную систему (рис. 1.3.2). В этом случае каждая фаза должна соединяться со своим приемником двумя проводами, что экономически невыгодно.

Более экономичными являются связанные цепи, в которых фазы генератора соединены между собой, но в какой-то мере сохраняют самостоятельность и независимость.

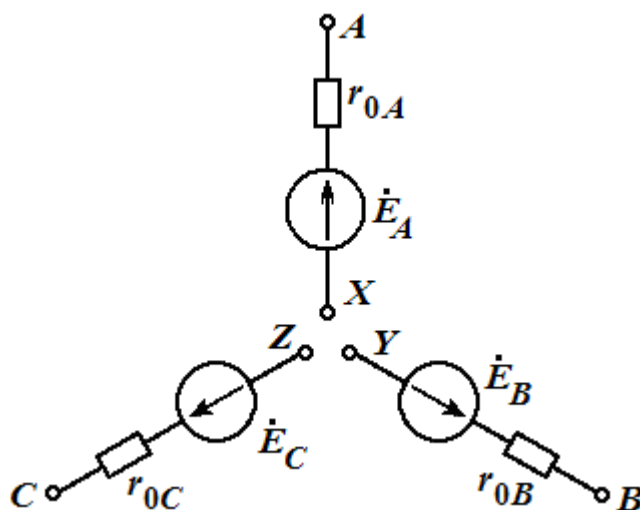


Рис. 1.3.2. Несвязанная трехфазная система

В целях экономии числа соединительных проводов фазы обмоток трехфазного генератора соединяют *звездой* или *треугольником*.

При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается с шести до четырех или до трех.

При соединении генератора звездой концы его фаз  $X, Y, Z$  объединяются в одну точку, которую называют нейтральной (или нулевой) точкой генератора и обозначают буквой  $N$  (рис. 1.3.3). Выходы источников генератора обозначают буквами  $A, B, C$ .

Важной особенностью трехфазных цепей при соединении фаз источника *звездой* является наличие двух различных напряжений – фазных и линейных.

Фазными называются напряжения между началами и концами фаз, т.е.  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ , а линейными — напряжения между началами двух различных фаз, т.е.  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ . За положительное направление фазных напряжений принято направление от начала к концу фаз обмоток (см. рис. 1.3.3).

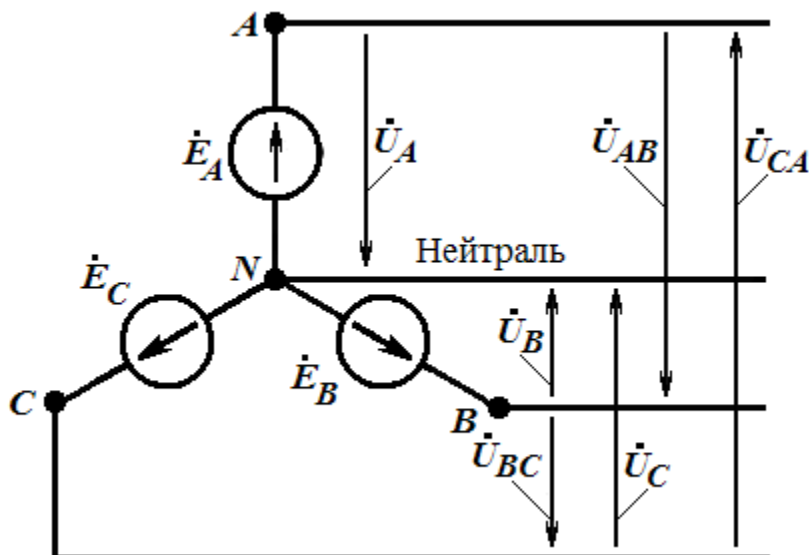


Рис. 1.3.3. Соединение фаз генератора звездой

При соединении обмоток генератора треугольником (рис. 1.3.4, а) конец  $X$  первой обмотки генератора соединяется с началом  $B$  второй, конец  $Y$  второй — с началом  $C$  третьей, конец  $Z$  третьей — с началом  $A$  первой. Схема соединения фаз источника треугольником (чаще всего так соединяют вторичные обмотки трехфазных трансформаторов) позволяет получить только линейные напряжения —  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ .

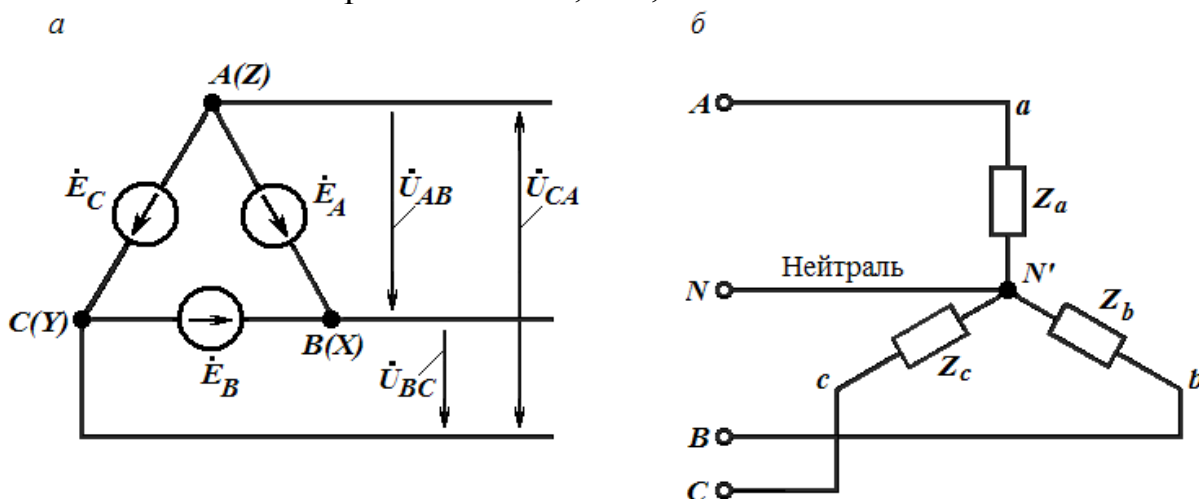


Рис. 1.3.4. Соединение фаз генератора треугольником (а),  
соединение фаз нагрузки звездой (б)

Соединение фаз нагрузки (приемника) звездой получается аналогично (см. рис.1.3.4, б), причем начала и концы фаз обозначаются строчными

буквами  $a, b, c$  и  $x, y, z$ , соответственно. При этом также образуется нейтральная точка  $N'$ . Провод, соединяющий нейтральные точки генератора (см. рис. 1.3.3) и нагрузки, называется *нейтральным* (или *нулевым*) проводом, а остальные провода – *линейными*. Приемник называется *симметричным*, если комплексные сопротивления фаз равны между собой:  $Z_a = Z_b = Z_c = z \cdot e^{j\varphi}$ .

Если это условие не выполняется, то приемник считается *несимметричным*. При этом, если *модули нагрузок* одинаковы, то трехфазный приемник называют *равномерным*. Если равны *фазы*, то приемник называют *однородным*.

На рис. 1.3.5,  $a$ – $d$  приведено пять различных способов соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой, причем фазы генератора изображены своими обмотками.

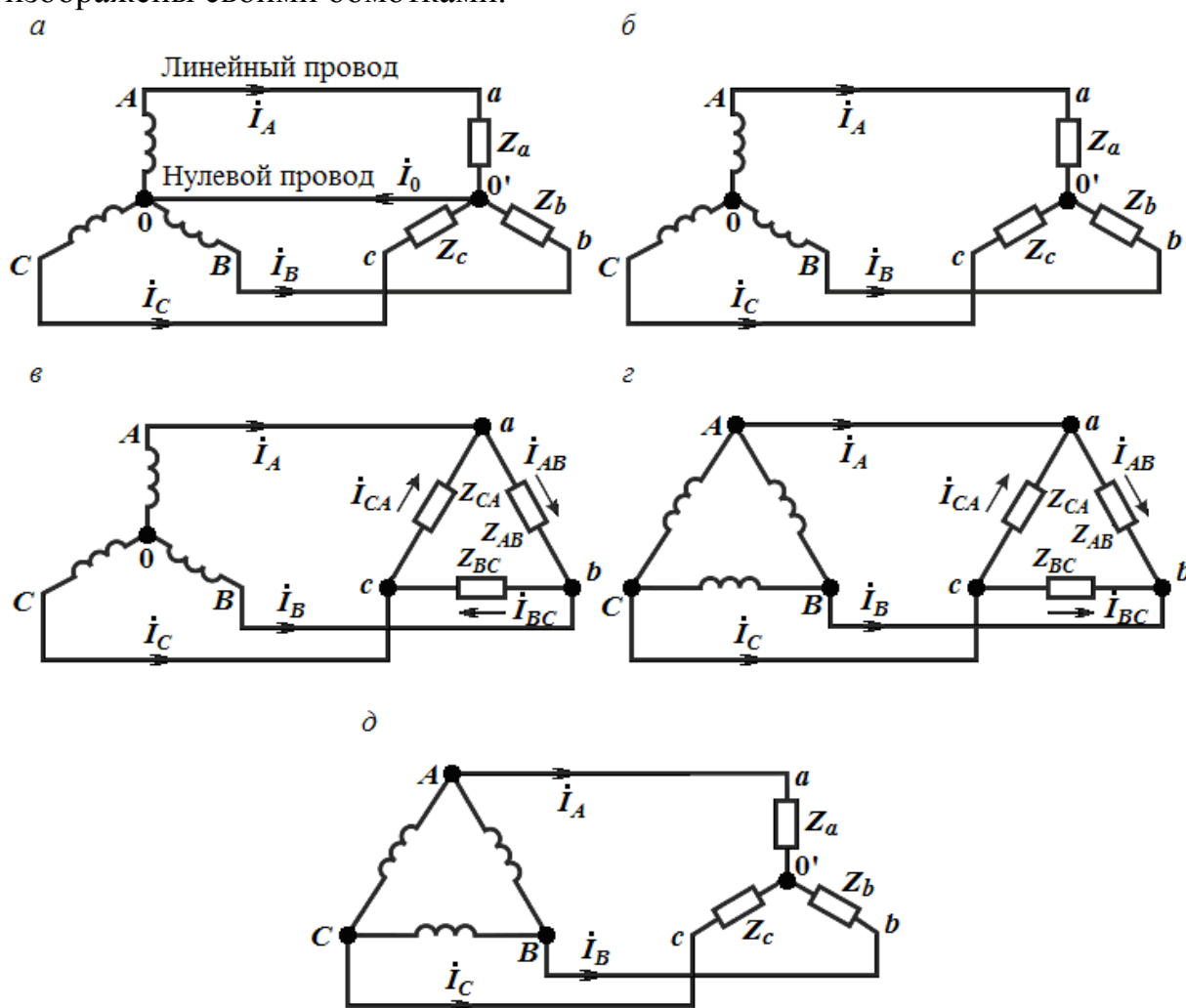


Рис. 1.3.5. Способы соединения фаз трехфазного генератора и нагрузки ( $a, \text{б}, \text{в}, \text{г}, \text{д}$ )

Токи в фазах генератора или приемника называются фазными токами:  $I_A, I_B, I_C$  или  $I_a, I_b, I_c$ . Напряжения на фазах приемника  $U_a, U_b, U_c$  также считаются

фазными, обозначаются строчными буквами и направлены так же, как и фазные напряжения источника – от начала фаз к их концам. На рис. 1.3.5, а и б приведены схемы типа «звезда-звезда», которые отличаются отсутствием нейтрального провода. Так часто поступают при симметричном приемнике, когда токи в фазах приемника равны между собой и ток в нейтрали, равный геометрической сумме фазных токов, будет равен нулю, т.е.  $\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ . Поскольку ток в нейтрали равен нулю, то необходимость в нейтральном проводе отпадает и схема становится трехпроводной. На рис. 1.3.5, в–д приведены схемы трехфазных цепей типов: «звезда-треугольник», «треугольник-треугольник» и «треугольник-звезда».

Текущие по линейным проводам токи называют линейными токами, их обозначают  $I_A, I_B, I_C$ . Условимся за положительное направление для них принимать направление от генератора к нагрузке. Модули линейных токов часто обозначают через  $I_L$ , не указывая никакого дополнительного индекса. Такое обозначение применяется большей частью тогда, когда все линейные токи по модулю одинаковы.

Как показано на рис. 1.3.4, линейные напряжения источника обозначают двумя индексами, а фазные – одним. Модуль линейного напряжения обозначают  $U_L$ , а фазного –  $U_\Phi$ . Для установления соотношений между  $U_L$  и  $U_\Phi$  составим для них уравнения по 2-му закону Кирхгофа:  $u_{AB} + u_B - u_A = 0$ ,  $u_{BC} + u_C - u_B = 0$ ,  $u_{CA} + u_A - u_C = 0$ , или  $u_{AB} = u_A - u_B$ ,  $u_{BC} = u_B - u_C$ ,  $u_{CA} = u_C - u_A$ .

Аналогичный вид имеют выражения для этих напряжений в комплексной форме. Построив по ним векторную диаграмму для одного из линейных напряжений (рис. 1.3.6), можно убедиться, что  $U_L$  по модулю в  $\sqrt{3}$  раза больше фазного напряжения генератора ( $U_\Phi$  генератора), т.е.  $U_L = \sqrt{3} U_\Phi$ . Это следует из того, что  $U_L$  есть основание равнобедренного треугольника с острыми углами по  $30^\circ$ .

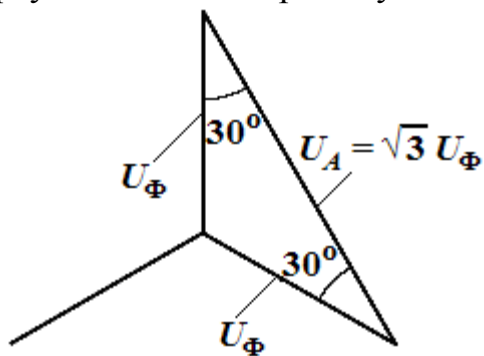


Рис. 1.3.6. Векторная диаграмма одного из линейных напряжений

Предусмотренные ГОСТом линейные и фазные напряжения для цепей низкого напряжения связаны именно этим соотношением, например,  $U_L = 660$  В и  $U_\Phi = 380$  В;  $U_L = 380$  В и  $U_\Phi = 220$  В;  $220$  В и  $127$  В. Следует отметить, что фазные напряжения генератора принято считать равными фазным э.д.с. (из-за малости сопротивления обмоток  $r_0$ ) и изображать их симметричной системой векторов.



Приемники, включаемые в 3-фазную цепь, могут быть как однофазные (осветительные приборы, холодильники, телевизоры и т.п.), так и 3-фазные (индукционные печи, станки, асинхронные двигатели и др.). Обычно электрические осветительные приборы – типичные несимметричные приемники, включают либо звездой в 4-проводную цепь, либо треугольником в 3-проводную цепь.

### Соединение элементов трехфазной цепи звездой

На рис. 1.3.7 приведена схема 4-проводной цепи, в которой фазы генератора и нагрузки соединены звездой. Кроме того, в схеме приведены также внутренние комплексные сопротивления фаз генератора  $Z_0$  и комплексные сопротивления соединительных проводов – линий  $Z_L$ .

Если пренебречь внутренними сопротивлениями  $Z_{0A}$ ,  $Z_{0B}$  и  $Z_{0C}$  фаз генератора, а также сопротивлениями  $Z_L$  линейных и нейтрального  $Z_N$  проводов, то фазные напряжения приемника будут равны фазным напряжением источника:

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

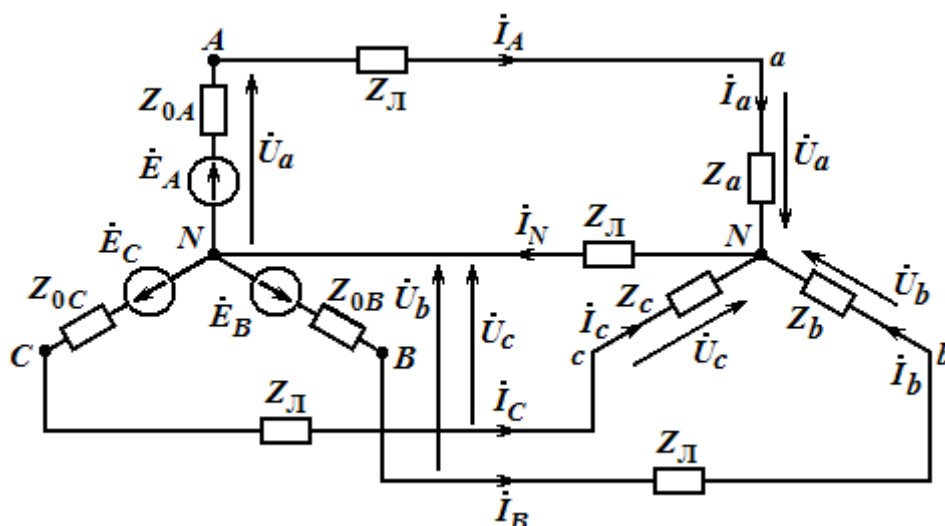


Рис. 1.3.7. Схема 4-проводной цепи, в которой фазы генератора и нагрузки соединены звездой

Тогда фазные токи приемника находят по формулам:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}, \quad (1.3.2)$$

причем,  $\dot{I}_a = \dot{I}_A$  и т.п., а ток в нейтральном проводе:

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

Для симметричных приемников фазные токи равны между собой и сдвинуты относительно соответствующих фазных напряжений на один и

тот же угол. Векторная диаграмма напряжений и токов для такого случая приведена на рис. 1.3.8.

Из нее следует, что  $\dot{I}_N = 0$ , т.е. для симметричных приемников, соединенных звездой, нейтральный провод не нужен и его не ставят. Трехфазная цепь без нейтрального провода называется трехпроводной и в нее включаются только симметричные трехфазные нагрузки: электродвигатели, электрические печи и т.п., т.к. только в этом случае потенциалы нейтральных точек источника и приемника будут одинаковы.

Очевидно, что для симметричных приемников, соединенных звездой, справедливо ранее выведенное соотношение между фазными и линейными напряжениями, т.е.  $U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ , т.к. фазные и линейные напряжения источника и приемника равны между собой.

Кроме того, фазные и линейные токи цепи равны между собой, т.е.  $I_L = I_\Phi$ . При расчете симметричных трехфазных цепей типа «звезда-звезда» достаточно определить ток только в одной фазе.

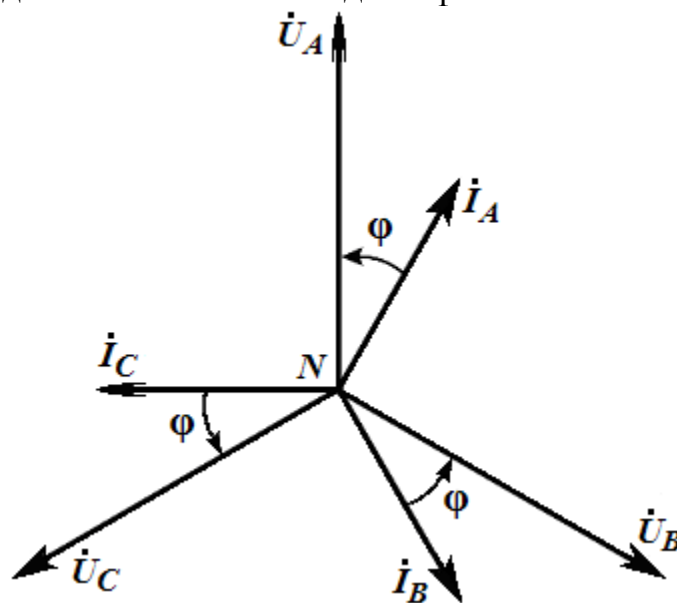


Рис. 1.3.8. Векторная диаграмма 4-проводной сети

Если в 4-проводную цепь (см. рис. 1.3.7) включить несимметричный приемник, то благодаря наличию нейтрального провода фазные напряжения приемника также сравняются с фазными напряжениями источника и по амплитуде и по фазе, но фазные токи приемника и линейные токи всей цепи будут различными. Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

Поэтому в такую цепь включают однофазные приемники, режимы, работы которых не зависят друг от друга, например, квартиры жилого дома, подъезды и даже целые этажи.

Следует помнить, что ток  $I_N$  в нейтральном проводе зависит не только от характера сопротивлений фаз, но и от схемы их включения.

Например, если конденсатор и катушку индуктивности на рис. 1.3.9, а поменять местами, то ток  $I$ , возрастет в несколько раз.

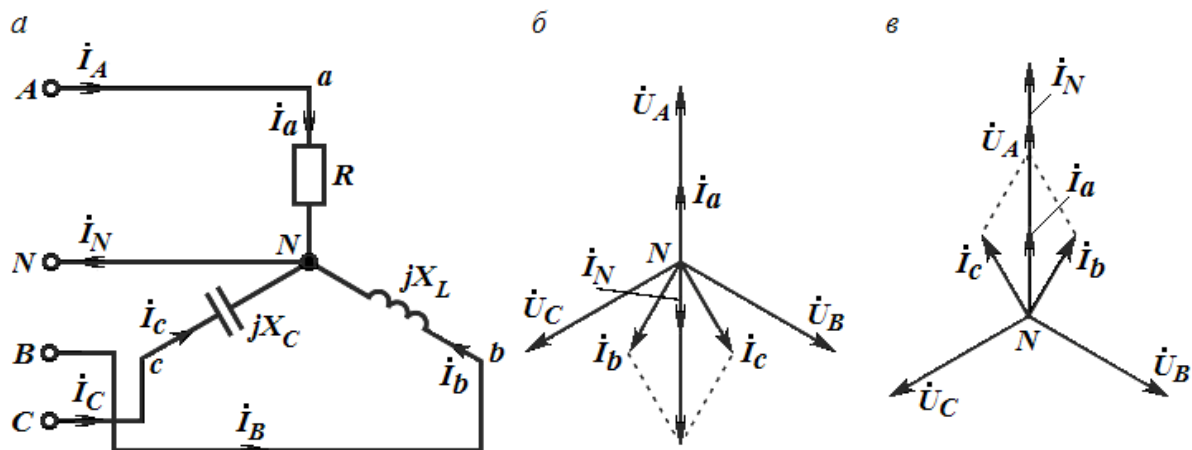


Рис. 1.3.9. Схема 4-проводной цепи с несимметричным приемником (а), векторные диаграммы цепи (б, в)

При включении несимметричных приемников в трехпроводную цепь типа «звезда-звезда» между нейтральными точками приемника и источника возникает напряжение  $U_{NN}$ , называемое напряжением между нейтралями. Его можно определить по формуле узлового напряжения через проводимости фаз, а затем использовать для нахождения фазных напряжений приемника по формулам:

$$U_a = U_A - U_{NN}; U_b = U_B - U_{NN}; U_c = U_C - U_{NN}, \quad (1.2.4)$$

$$\text{где } \dot{U}_{NN} = \frac{\dot{U}_a Y_a + \dot{U}_b Y_b + \dot{U}_c Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c},$$

а по ним фазные токи:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (1.3.5)$$

Векторы фазных напряжений приемника можно определить графически по диаграмме фазных напряжений генератора и напряжения между нейтралями. Напряжение между нейтралями может возникнуть и в 4-проводной цепи при обрыве нейтрального провода. Тогда могут резко возрасти фазные напряжения в нагрузке. Поэтому в нейтральный провод нельзя включать плавкие предохранители и выключатели.

*Соединение элементов трехфазной цепи треугольником*

На рис. 1.3.5, в приведена требуемая схема включения фазных сопротивлений  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  к линейным проводам трехфазного источника. Особенностью такого соединения является равенство следующих фазных напряжений приемника  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , соответствующим линейным напряжениям генератора, т.е.  $U_{\phi} = U_{л}$ . Но фазные токи нагрузки не будут равны линейным токам, поскольку в узлах приемника эти токи распределяются по двум ветвям. Фазные токи могут быть определены по формулам:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\bar{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\bar{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\bar{Z}_{ca}}. \quad (1.3.6)$$

Линейные токи определяются по фазным токам из уравнений, составленных по 1-му закону Кирхгофа для узлов  $a$ ,  $b$  и  $c$  (см. рис. 1.3.5, в):

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (1.3.7)$$

Если приемник симметричный, то фазные токи приемника равны по модулю, а углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям одинаковы. Из векторной диаграммы (рис. 1.3.10) видно, что

$$I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}. \quad (1.3.8)$$

Для симметричных приемников расчет токов производится только для одной фазы по закону Ома.

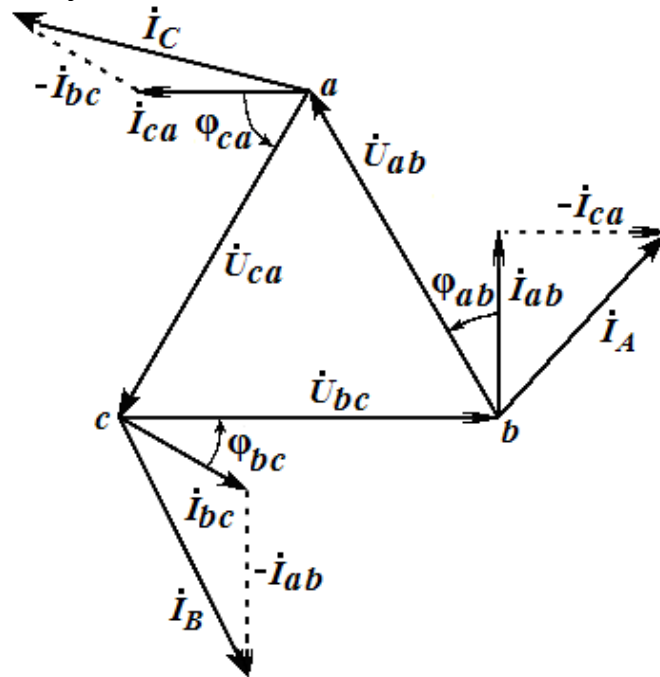


Рис. 1.3.10. Векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении элементов треугольником

Следует заметить, что в трехпроводной цепи независимо от характера приемников геометрическая сумма линейных токов равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (1.3.9)$$

Особенностью соединения нагрузки *треугольником* является то, что изменение режима одной из фаз не отражается на режиме работы других фаз, т.к. они подключены к неизменным линейным напряжениям источника. Изменяться будут только линейные токи в проводах, соединенных с данной фазой. Поэтому схему соединения треугольником используют для включения несимметричных однофазных приемников в 3-проводную осветительную сеть. Поскольку симметричные трехфазные приемники можно включать в трехпроводную цепь не только *треугольником*, но и *звездой*, то это значительно расширяет область их применения. Поэтому на щитках электродвигателей указывают два напряжения – одно для включения фаз звездой, а второе – треугольником, что всегда позволяет выбрать из них требуемое.

#### *Мощность трехфазных цепей и схемы ее измерения*

Под активной мощностью трехфазной системы понимают сумму активных мощностей фаз и активной мощности, выделяемой в сопротивлении нейтрального провода,

$$P = P_A + P_B + P_C + P_N.$$

Аналогично определяется реактивная мощность трехфазной цепи:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C + Q_N.$$

Полная мощность цепи равна:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1.3.10)$$

Если нагрузка равномерная и однородная, то

$$P_N = Q_N = 0; P_A = P_B = P_C = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi \\ \text{и } Q_A = Q_B = Q_C = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi.$$

Тогда для всей цепи:

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi; Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi; S = 3U_\Phi I_\Phi. \quad (1.3.11)$$

Для измерения активной мощности трехфазной цепи в общем случае (неравномерная нагрузка и наличие нейтрального провода) необходимо три ваттметра (рис. 1.3.11, а), причем за результат следует взять сумму показаний этих приборов. Если нейтральный провод отсутствует, то измерение мощности производят методом 2-х ваттметров по схеме на рис. 1.3.11, б и также суммируют показания.

Во втором методе участвуют линейные токи и напряжения и вместо формул (1.3.11) используют следующие:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi_\Phi; Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi_\Phi \text{ и } S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}. \quad (1.3.12)$$

Измерение реактивной мощности осуществляется с помощью одного ваттметра (см. рис. 1.3.11, в), обмотка напряжения которого включена между двумя линиями цепи, а токовая обмотка включена в разрыв оставшейся линии.

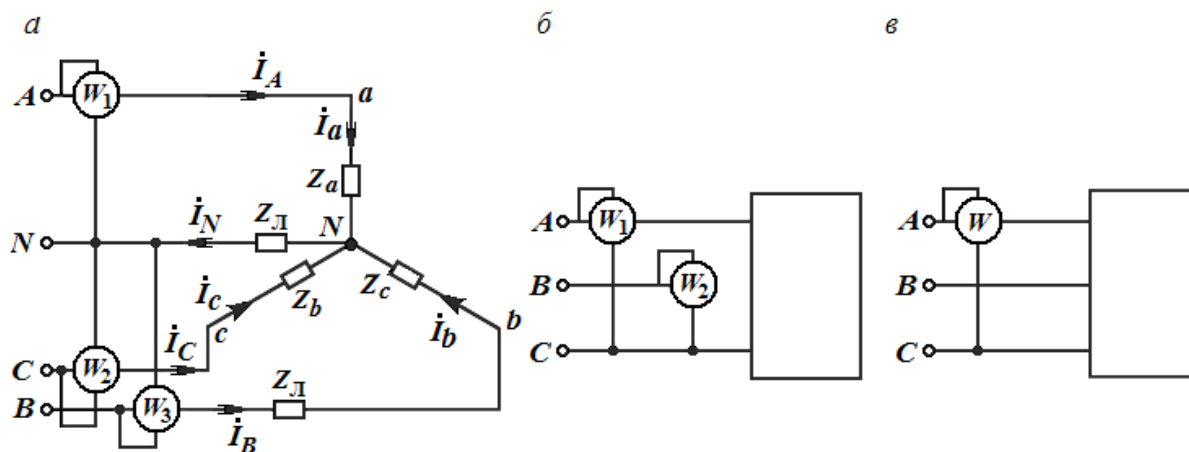


Рис. 1.3.11. Подсоединения 3-х ваттметров в трехфазную цепь (а), 2-х ваттметров, когда нет нейтрального провода (б), одного ваттметра для измерения реактивной мощности (в)

### Преимущества трехфазных систем

Широкое распространение трехфазных систем объясняется следующими причинами:

- а) передача энергии трехфазным током экономически более выгодна, чем током с иным числом фаз;
- б) элементы трехфазной системы – трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор – более просты в изготовлении, экономичны и надежны в работе;
- в) легкость получения вращающегося магнитного поля.

### ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. К источнику трехфазной сети с линейным напряжением  $U_L = 380$  В и частотой  $f = 50$  Гц подключена равномерная нагрузка, соединенная по схеме «звезда», с полным сопротивлением в фазе  $Z = 90$  Ом и индуктивностью  $L = 180$  мГн. Определить активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности, действующие значения линейного тока и напряжения. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

*Решение*

Фазное напряжение:

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

Фазный ток:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{220}{90} = 2,45 \text{ А.}$$

Линейный ток:

$$I_L = I_{\phi} = 2,45 \text{ А.}$$

Реактивное сопротивление в фазе:

$$X_L = \omega L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,18 = 56,5 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление в фазе

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} = \sqrt{90^2 - 56,5^2} = 70 \text{ Ом.}$$

Коэффициент мощности катушки:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{70}{90} = 0,778.$$

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,778 = 1260 \text{ Вт} = 1,26 \text{ кВт},$$

или

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi = 1,733 \cdot 380 \cdot 2,45 \cdot 0,778 = 1260 \text{ Вт} = 1,26 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность нагрузки:

$$Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,628 = 1010 \text{ Вт} \approx 1 \text{ кВт},$$

или

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi = 1,733 \cdot 380 \cdot 2,45 \cdot 0,628 = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт.}$$

Полная потребляемая мощность:

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi} = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 = 1620 \text{ Вт} = 1,62 \text{ кВт},$$

или

$$S = \sqrt{3}U_L I_L = 1,733 \cdot 380 \cdot 2,45 = 1620 \text{ Вт} = 1,62 \text{ кВт.}$$

Векторная диаграмма имеет вид (рис. 1.3.12.).

2. К четырехпроводной трехфазной сети с действующим значением линейного напряжения 220 В подключена неравномерная активная нагрузка с потребляемой мощностью в фазах  $P_A = 3 \text{ кВт}$ ,  $P_B = 1,8 \text{ кВт}$ ,  $P_C = 0,6 \text{ кВт}$ . Определить действующее значение тока в нейтральном проводе.

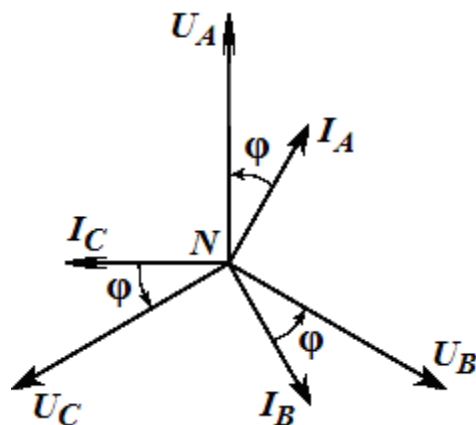


Рис. 1.3.12. Векторная диаграмма для задачи

*Решение*

Напряжение в каждой фазе:

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

Токи в фазах:

$$I_A = \frac{P_A}{U_{\phi}} = \frac{3000}{127} = 23,4 \text{ А,}$$

$$I_B = \frac{P_B}{127} = 14,2 \text{ А,}$$

$$I_C = \frac{P_C}{U_{\phi}} = 4,7 \text{ А.}$$

Ток в нейтральном проводе определяем из векторной диаграммы (рис. 1.3.13.) как сумму векторов фазных токов:

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

$$\dot{I}_N = 16 \text{ А.}$$

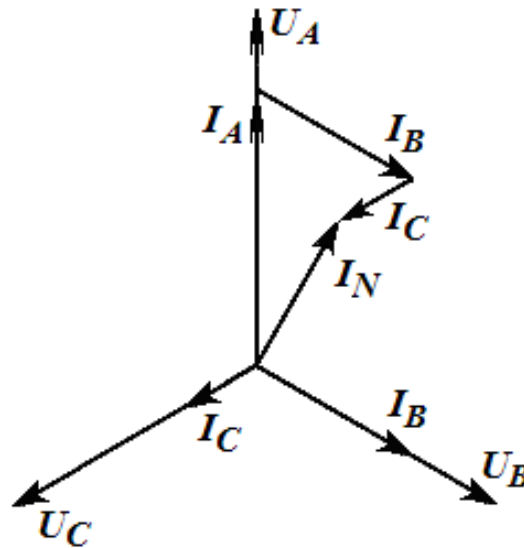


Рис. 1.3.13. Векторная диаграмма для задачи



## 2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

### 2.1. Электроизмерительные приборы и электрические измерения

#### *Общие сведения и характеристики средств измерений*

*Измерение* – это нахождение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств и выражение этих значений в принятых единицах. Средствами измерений называют технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики. К ним относятся меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и измерительные установки. Основной характеристикой средств измерений является погрешность измерений, по которой судят об их точности. Другими важными их показателями являются диапазон измерений, быстродействие и вид функции преобразования (характер шкалы). Существуют следующие виды погрешностей:

– *абсолютная погрешность*, понимаемая как разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta X = \pm (X - X_{\text{д}}),$$

– *относительная погрешность* – отношение абсолютной погрешности прибора к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\delta X = \pm \frac{\Delta X_{\text{п}}}{X_{\text{п}}} \cdot 100\%,$$

(например, акселерометр измеряет скорость потока жидкости с относительной погрешностью  $\pm 5\%$ );

– *приведенная погрешность* – отношение абсолютной погрешности измерения к диапазону измерений устройства, также выраженное в процентах:

$$\gamma X = \pm \frac{\Delta X_{\text{п}}}{X_{\text{max}}} \cdot 100\%,$$

например, тестер типа ТЛ-4 имеет приведенную погрешность измерения напряжения  $\pm 4\%$ .

Большинство измерительных приборов имеют примерно постоянную абсолютную погрешность, но их относительная погрешность изменяется с изменением измеряемой величины, что неудобно.

Различают также погрешности:

- основные, которые существуют при нормальных условиях измерения;
- дополнительные, которые увеличивают основную погрешность при отклонении условий измерения (например, температуры окружающей среды) от нормальных.

В паспорте измерительного прибора указывают относительную допустимую погрешность

$$\gamma = \pm \left[ c \pm d \cdot \left( \frac{X_K}{X_D} - 1 \right) \right] \cdot 100\%,$$

где  $c$  и  $d$  – постоянные величины,

$X_K$  и  $X_D$  – конечное и действительное значения измеряемой величины. Эта формула косвенно указывает на то, что измерения, производимые во второй половине шкалы прибора, будут более точными.

*Классом точности* средств измерений называют обобщенную их характеристику, определяемую пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, значение которой округлено до ближайшего значения из ряда 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,5; 4%. Класс точности указывают на шкале прибора. Условные обозначения, наносимые на шкалу приборов, характеризуют:

- 1) систему преобразователя;
- 2) род измеряемого тока;
- 3) класс точности
- 4) нормальное положение и др.

Примеры обозначения системы преобразователя представлены на рис. 2.1.1.

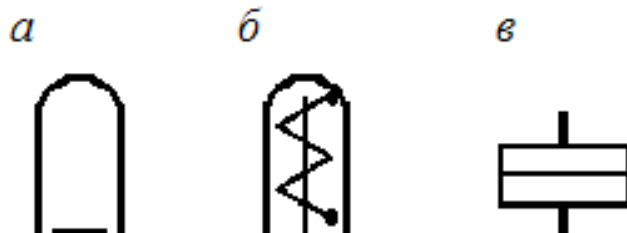


Рис.2.1.1. Обозначения системы преобразователя:  
 $a$  – магнитоэлектрический преобразователь;  $б$  – электромагнитный преобразователь;  $в$  – электродинамический преобразователь

Обозначение рода измеряемого тока показано на рис. 2.1.2.



Рис. 2.1.2. Обозначение рода тока:  
 $a$  – постоянный ток;  $б$  – переменный ток;  
 $в$  – постоянный и переменный ток;  $г$  – трехфазный ток

Примеры обозначения класса точности приведены на рис. 2.1.3,  $a$ ,  $б$ ,  $в$ . На рис. 2.1.3,  $г$  показано, что нормальное положение прибора при работе – горизонтальное, а на рис. 2.1.3,  $д$  – вертикальное.

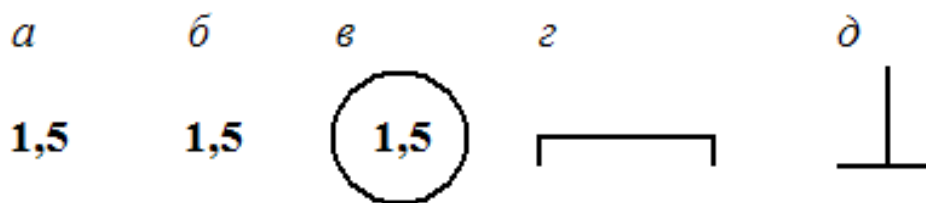


Рис. 2.1.3. Обозначение класса точности

### *Электромеханические измерительные приборы*

Измерительные приборы бывают стрелочными и цифровыми. Стрелочные измерительные приборы различаются типом измерительного механизма (преобразователя) и могут быть магнитоэлектрическими, электромагнитными, электродинамическими, электростатическими и др. В магнитоэлектрическом механизме (рис. 2.1.4, а) вращающий электромагнитный момент  $F$  создается взаимодействием тока подвижной катушки с постоянным магнитом.

*Магнитоэлектрический измерительный преобразователь* – один из самых сложных, но и наиболее точный измерительный механизм. Он имеет линейную зависимость угла отклонения стрелки от тока в подвижной катушке ( $\alpha = k \cdot I$ ) и работает только на постоянном токе.

В *электромагнитном измерительном преобразователе* (рис. 2.1.4, б) измеряемый ток пропускают по неподвижной катушке. Этот ток создает магнитное поле, которое втягивает внутрь катушки стальной сердечник. Возникающая при этом сила уравнивается пружиной. Прибор имеет нелинейную (квадратичную) шкалу ( $\alpha = k \cdot I^2$ ), но работает как на переменном, так и на постоянном токе.

В *электродинамической системе* измерения (рис. 2.1.4, в) механический момент возникает в результате взаимодействия токов, протекающих в двух катушках одной – неподвижной, а другой – подвижной. Угол отклонения стрелки пропорционален произведению токов в катушках ( $\alpha = I_1 \cdot I_2 \cos \varphi$ ), что очень удобно для измерения мощности.

### *Измерение тока и напряжения*

Ток измеряют с помощью амперметра, который включают в разрыв ветви электрической цепи (рис. 2.1.5, а).

Для уменьшения влияния прибора на состояние измеряемой цепи амперметр должен иметь малое внутреннее сопротивление.

Обычно падение напряжения на измерительной катушке не превышает 0,25 В. Для расширения предела измеряемого тока параллельно амперметру включают шунт – резистор с сопротивлением  $R_{ш}$  (рис. 2.1.5, б), через который протекает основная часть измеряемого тока, так как  $R_{ш} \ll R_A$ .

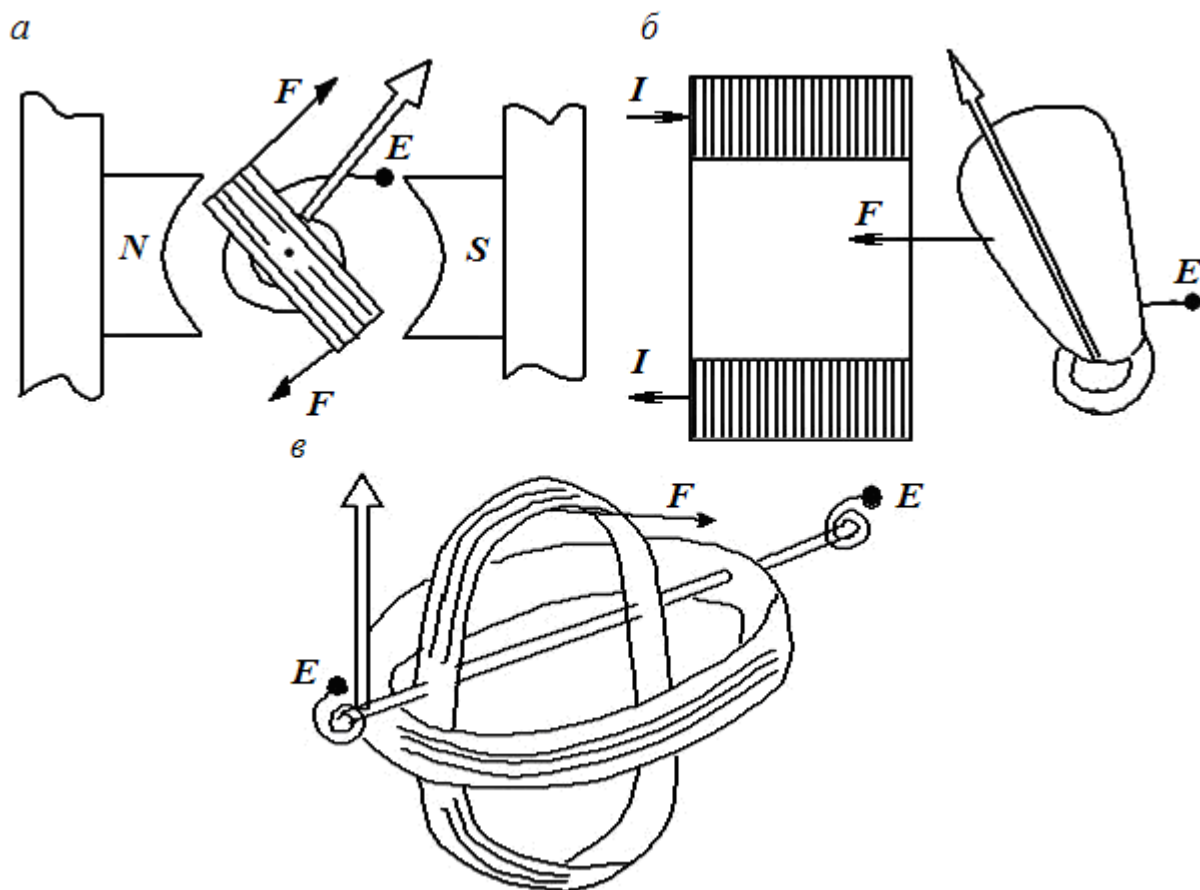


Рис. 2.1.4. Конструкция измерительных приборов: магнитоэлектрического (*а*), электромагнитного (*б*), электродинамического (*в*)

Для измерения больших переменных токов используют измерительные трансформаторы тока (клещи) (рис. 2.1.5, *в*).

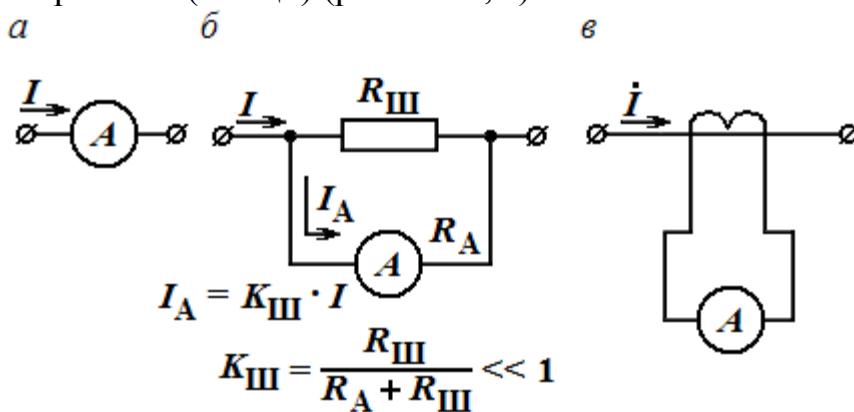


Рис. 2.1.5. Обозначение амперметра (*а*), включение амперметра с шунтом (*б*), включение амперметра с измерительным трансформатором (*в*)

Напряжение измеряют с помощью вольтметра, который включают параллельно элементам электрической цепи или к ее узлам (рис. 2.1.6, *а*). Для уменьшения влияния прибора на состояние измеряемой цепи вольтметр

должен иметь большое внутреннее сопротивление. Входное сопротивление тестера в режиме измерения напряжения – 20 кОм/В, а у электронного вольтметра – более 1 МОм. Для расширения предела измеряемого напряжения применяют резистивный делитель (рис. 2.1.6, б). Измерение переменных напряжений и токов приборами постоянного тока производится с использованием измерительных выпрямителей.

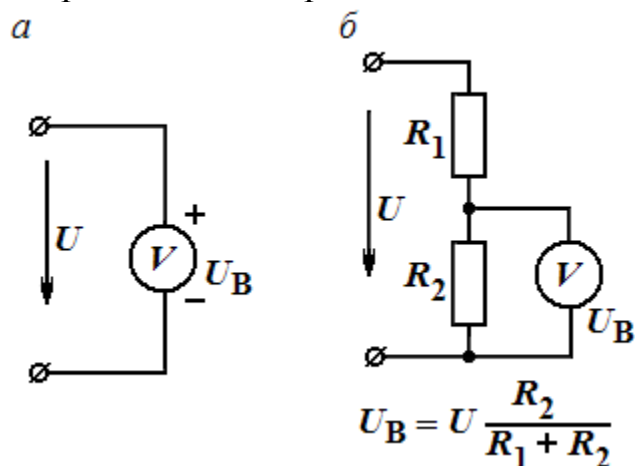


Рис. 2.1.6. Обозначение вольтметра (а),  
подсоединение к вольтметру резистивного делителя (б)

Для измерения мощности используют приборы электродинамической системы (см. рис. 2.1.4, в) – ваттметры, которые имеют две измерительных обмотки: одну – токовую, а другую – напряжения (с добавочным сопротивлением).

Для измерения мощности цепи постоянного тока или однофазного переменного тока ваттметр включают так, как показано на рис. 2.1.7, а. В трехфазной цепи мощность измеряют с помощью однофазных ваттметров, включая их либо на линейные (см. рис. 2.1.7, б), либо на фазные (см. рис. 2.1.7, в) напряжения.

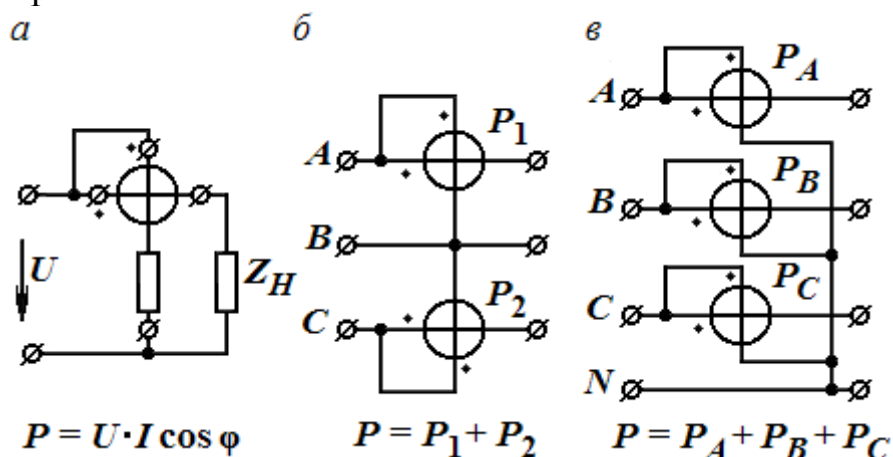


Рис. 2.1.7. Измерение мощности цепи постоянного тока или однофазного тока (а), измерение мощности в трехфазной цепи (б, в)

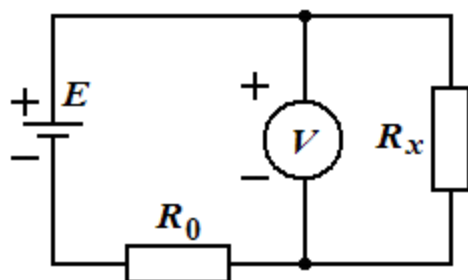
### Измерение сопротивления, емкости и индуктивности

Измерение сопротивлений требует наличия источника напряжения постоянного тока и измерительной цепи, содержащей один или несколько образцовых (эталонных) резисторов. В самых простых приборах в качестве измерительной цепи используется обычный делитель напряжения, составленный образцовым  $R_0$  и неизвестным  $R_x$  резисторами (рис. 2.1.8, а). Тогда падение напряжения на резисторе  $R_x$  выражается следующей формулой:

$$U_x = \frac{E \cdot R_x}{R_0 + R_x}.$$

При  $R_x = 0$   $U_x = 0$ , а при  $R_x$ , равном бесконечности,  $U_x = E$ . Таким образом, шкала прибора растянута в начале шкалы и сжата в конце, т.е. нелинейна.

а



б

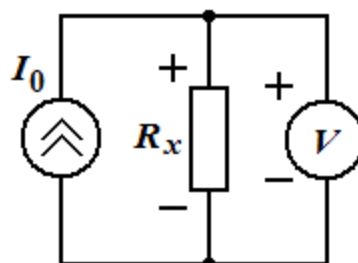


Рис. 2.1.8. Измерение сопротивлений с помощью делителя напряжения (а), в цифровых омметрах (б)

В цифровых электронных омметрах через неизвестное сопротивление пропускают образцовый ток, как показано на рис. 2.1.8, б. Тогда падение напряжения на  $R_x$  равно  $U_x = R_x I_0$  и шкала отсчета  $R_x$  получается линейной.

Для измерения  $L_x$  и  $C_x$  требуется генератор синусоидального напряжения фиксированной частоты и часто применяют резонансный метод. Измерительная цепь резонансного измерителя  $\frac{L_x}{C_x}$  представлена на рис. 2.1.9.

Здесь изменяют значение образцового элемента (например,  $C_0$  при измерении  $L_x$ ) до момента достижения резонанса (до максимального напряжения, фиксируемого вольтметром  $V$ ) и по шкале, кинематически связанной с осью регулировки образцового элемента, производят отсчет значения  $L_x$ .

Для измерения  $C_x$  изменяют значение  $L_0$ , добиваясь максимального напряжения на вольтметре  $V$ , и после этого производят отсчет  $C_x$  по шкале, кинематически связанной с осью регулировки  $L_x$ .

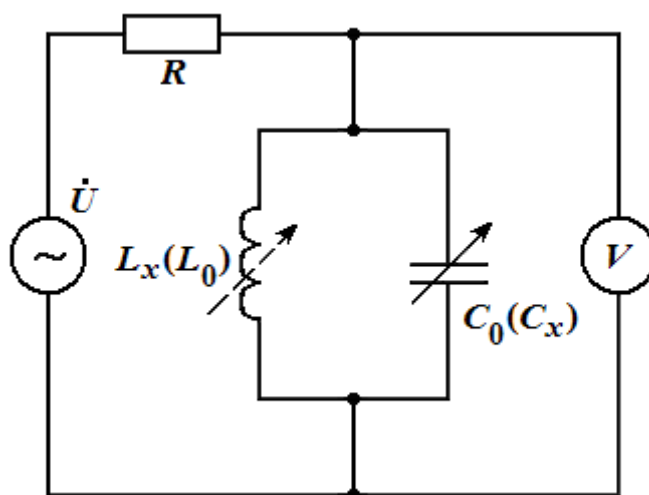


Рис. 2.1.9. Измерение  $L$  и  $C$

Для создания универсальных измерителей параметров электрических цепей, т.е. измерителей  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , обычно применяют мостовые измерительные цепи переменного тока. Их особенностью является необходимость в приведении этой цепи к состоянию компенсации по измеряемому параметру: активной  $R_x$  или реактивной  $X_x$  составляющим комплексного сопротивления  $Z_x$  объекта измерения – резистора, конденсатора или катушки индуктивности. Для осуществления этой компенсации необходимо иметь два регулируемых органа, изменяющих значения двух образцовых элементов –  $R_0$  и  $C_0$  (либо  $L_0$ ), по состояниям которых производится отсчет измеряемых величин. Отсюда вытекает сложность таких устройств и трудоемкость измерений. Однако несмотря на сложность и довольно высокую цену цифровые измерительные мосты переменного тока широко применяются в лабораторной практике.

*Метод измерения сопротивления, емкости и индуктивности с использованием схем типа «делитель напряжения»*

Рассмотрим этот метод на примере измерения параметров комплексного сопротивления  $Z_x$ . На рис. 2.1.10, *а* приведена параллельная схема соединения его компонентов  $R_x$  и  $C_x$ .

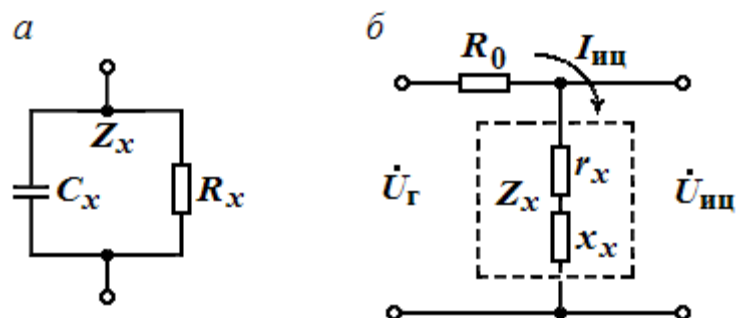


Рис. 2.1.10. Параллельное соединение  $R$  и  $C$  (*а*), эквивалентная схема измерительной цепи (*б*)

Подключив объект измерения с  $Z_x$  к резистору  $R_0$  и перейдя от параллельного соединения его составляющих:  $R_x$  и  $X_x$  к эквивалентной ей последовательной схеме замещения  $Z_x$  с компонентами:  $r_x$  и  $x_x$ , где  $r_x = \frac{X_x^2 \cdot R_x}{R_x^2 + X_x^2}$ ,  $x_x = \frac{R_x^2 \cdot X_x}{R_x^2 + X_x^2}$ , получим эквивалентную схему измерительной цепи типа «делитель напряжения» (см. рис. 2.1.10, б).

На рис. 2.1.11 приведена часть комплексной плоскости с векторной диаграммой напряжений в такой ИЦ, которая получается в случае подключения ее к генератору переменного напряжения  $\dot{U}_G = U_{Gm} \sin \omega t$ . Выходное напряжение цепи  $\dot{U}_{из}$  (показано вектором  $\overline{OQ}$ ) имеет по отношению к напряжению  $\dot{U}_G$  питания (показано вектором  $\overline{OM}$ ) фазовый сдвиг  $\varphi_{из}$  и равно:

$$\dot{U}_{из} = U_{Gm} \frac{r_x(R_0 + r_x) + jx_x R_0}{(R_0 + r_x)^2 + x_x^2}.$$

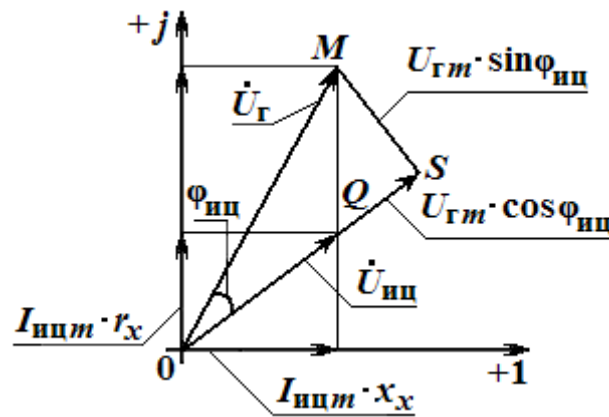


Рис. 2.1.11. Векторная диаграмма напряжений в измерительной цепи

Кроме того, на рис. 2.1.11 приведены проекции вектора  $10^{-10} \dots 10^3$  на вектор  $\dot{U}_{из}$ :

$$U_{Gm} \sin \varphi_{из} = \frac{U_{Gm}}{\left[ (R_0 + r_x)^2 + x_x^2 \right]} \cdot \frac{x_x}{\sqrt{r_x^2 + x_x^2}},$$

$$U_{Gm} \cos \varphi_{из} = \frac{U_{Gm}}{\left[ (R_0 + r_x)^2 + x_x^2 \right]} \cdot \left( \sqrt{r_x^2 + x_x^2} + \frac{r_x \cdot R_0}{\sqrt{r_x^2 + x_x^2}} \right).$$

В рассматриваемом методе, разработанном авторами, рекомендуется регулировать (увеличивать) напряжение питания цепи  $\dot{U}_G$  до тех пор, пока



не выполнится условие:  $U_{\text{иц} m} = U_{\Gamma m}$ . Поскольку в той же пропорции увеличатся все его проекции и амплитуда напряжения  $\dot{U}_{\text{иц}}$  станет равной

$$U_{\text{иц} m} = \frac{U_{\Gamma m} \sqrt{r_x^2 + x_x^2}}{(R_o + r_x)^2 + x_x^2},$$

то при  $U_{\text{иц} m} = U_{\Gamma m}$  новые значения  $U_{\Gamma m} \cdot \sin \varphi_{\text{иц}}$  и разности между  $U_{\Gamma m} \cdot \cos \varphi_{\text{иц}}$  и  $U_{\text{иц} m}$  становятся пропорциональными следующим параметрам  $Z_x$ : электрической емкости  $C_x$  и активной проводимости  $1/R_x$ :

$$U'_{\tilde{m}} \cdot \sin \varphi_{\text{иц}} = U_{\Gamma m} \cdot R_0 \cdot \omega \cdot C_x; U'_{\Gamma m} \cdot \cos \varphi_{\text{иц}} - U'_{\Gamma m} = \frac{U_{\Gamma m} \cdot R_0}{R_x}.$$

Состояние ИЦ по рис. 2.1.10, б, описываемое условием  $U_{\text{иц} m} = U_{\Gamma m}$ , является состоянием ее **квазикомпенсации**, поскольку полная компенсация такой ИЦ невозможна. Поэтому рассмотренный метод назван квазикомпенсационным. В уравнениях через  $\dot{U}'_{\Gamma m}$  обозначена амплитуда напряжения питания цепи после регулировки.

Особенностями нового метода измерения параметров резисторов, конденсаторов и катушек являются: наличие одного образцового нерегулируемого элемента  $R_0$ ; получение выходных сигналов в виде напряжений постоянного тока, пропорциональных только информативному параметру датчика и независимых от коэффициента передачи узла регулирования. Исследования показали, что этот метод универсален, т.к. позволяет измерять или преобразовывать в напряжения постоянного тока параметры  $Z_x$  любого характера и представленных любой схемой замещения.

### *Цифровые электроизмерительные приборы*

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) более удобны в работе и поэтому постепенно вытесняют стрелочные. Преимущества цифровых приборов:

- возможность вести автоматические измерения и передавать результат на любое расстояние без потери точности;
- повышенная точность измерений (у стрелочных приборов точность измерений не превышает 0,5-1 %, а у цифровых – измерения могут проводиться с точностью выше 0,001 %);
- значительно более высокая производительность – наиболее быстродействующие ЦИП обеспечивают свыше 1000000 измерений в секунду, наиболее точные ЦИП – не менее 25 измерений в секунду;
- возможность математической обработки результата и его запоминания;
- повышенная помехоустойчивость измерений.

Основным блоком ЦИП является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий непрерывную измеряемую величину в цифровой код. В АЦП происходит процесс сравнения неизвестной величины с известной (мерой). По способу сравнения АЦП бывают последовательные и параллельные. В последовательных АЦП имеется одна мера, равная единице младшего разряда, с которой многократно сравнивается измеряемая величина. Поэтому последовательные АЦП являются самыми непроизводительными, но самыми простыми. В параллельных АЦП применяется многозначные меры, и процесс сравнения со всеми значениями меры может происходить одновременно. Поэтому они считаются самыми быстрыми и наиболее сложными. Пример такого АЦП приведен на рис. 2.1.12.

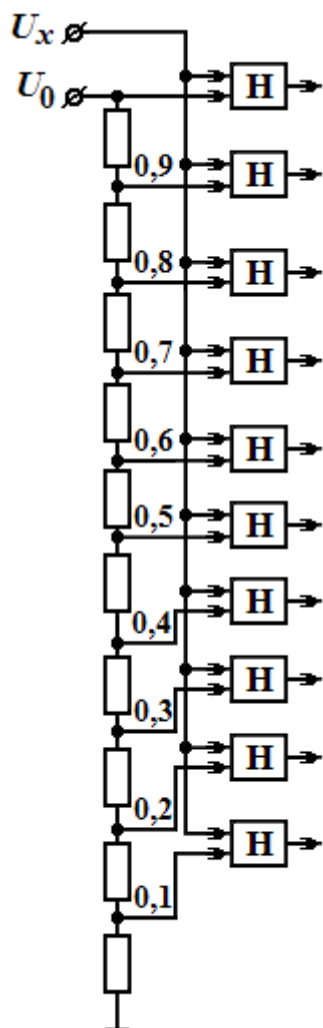


Рис. 2.1.12. Схема параллельного АЦП

В этом приборе процесс преобразования неизвестного напряжения  $U_x$  заключается в определении равенства его какому-либо значению образцового сигнала (меры – напряжения  $U_0$ ). Образцовый сигнал имеет 10 значений  $U_{0i}$ , равных от 1 до 0,1 В, и каждое из этих значений сравнивается с измеряемым сигналом  $U_x$  с помощью 10 устройств сравнения напряжений – нуль-органов  $H$ . Функция нуль-органов состоит в выработке сигнала низкого уровня, т.е. «0», если  $U_x < U_{0i}$ , либо сигнала высокого уровня – «1», если при сравнении окажется, что  $U_x > U_{0i}$ . Далее логическая схема (на рис. 2.1.12 не показана) определяет, на каких из нуль-органов имеется переход от «0» сигнала к «1» и представляет результат в цифровой форме.

В настоящее время известны и другие, более совершенные принципы построения АЦП, в частности: АЦП развертывающего и поразрядного типов, а также интегрирующие АЦП с однократным, двойным и тройным интегрированием, каждый из которых имеет свои особенности. Например, в развертывающих АЦП измеряемый сигнал предварительно преобразуется в пропорциональный временной интервал (или частоту)  $T_x = k_1 U_x$  и далее  $T_x$  преобразуется в цифровой код  $N_x = k_2 T_x$ . Пример АЦП развертывающего типа приведен на рис. 2.1.13.

Здесь по сигналу запуска генератор  $\Gamma 1$  вырабатывает линейно изменяющееся напряжение  $U_{\Gamma 1}$ . Напряжение  $U_{\Gamma 1}$  сравнивается с измеряемым напряжением  $U_x$  с помощью нуля-органа  $H$ . На выходе  $H$  с момента запуска и до момента равенства  $U_x = U_{\Gamma 1}$  образуется высокий уровень

напряжения и формируется интервал времени  $T_x$ , продолжительность которого пропорциональна значению  $U_x$  ( $T_x = k_1 U_x$ ). На время  $T_x$  ключ КЛ замыкается и импульсы с выхода генератора Г1 подсчитываются счетчиком импульсов СЧ.

На выходе счетчика СЧ образуется число  $N_x$ , представляющее собой оцифрованное значение измеряемого напряжения и являющееся его цифровым эквивалентом, т.е.  $N_x = k_2 T_x = k_1 k_2 U_x$ .

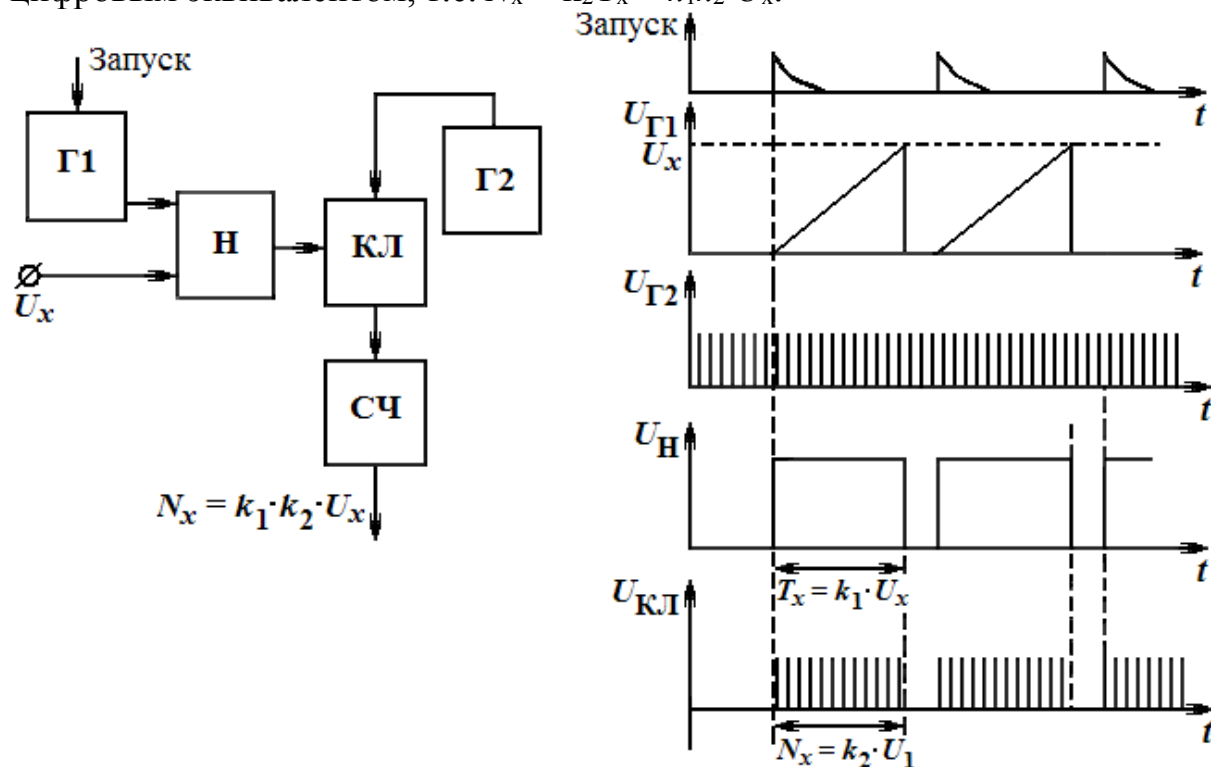


Рис. 2.1.13. Схема АЦП развортывающего типа (а), временные графики напряжений (б)

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Предельное значение тока, измеряемого миллиамперметром,  $I = 4 \cdot 10^{-3}$  А, сопротивление которого  $R_{вн} = 5$  Ом. Определить сопротивление  $R_{ш}$  шунта, используемого для расширения предела измерения тока до  $I = 15$  А.

2. Определить значение сопротивления шунта  $R_{ш}$ , необходимого для расширения пределов измерения тока гальванометром, имеющего сопротивление  $R_{Г} = 150$  Ом, от номинального его значения тока  $I_{н} = 2 \cdot 10^{-4}$  А до значения  $I = 6 \cdot 10^{-3}$  А.

3. Определить значение добавочного сопротивления  $R_{д}$ , позволяющего расширить пределы измерения гальванометром, имеющим сопротивление  $R_{Г} = 150$  Ом, напряжения от его номинального значения  $U_{н} = 2 \cdot 10^{-3}$  В до значения  $U = 10 \cdot 10^{-2}$  В.

4. Верхний предел измерений вольтметра  $U_n = 100$  В, сопротивление  $r_B = 10000$  Ом, число делений шкалы  $N = 100$ . Определить цену деления вольтметра, если он включен с добавочным резистором  $r_D = 30000$  Ом. Указать правильный ответ.

- а) 3 В/дел. б) 2 В/дел. в) 4 В/дел. г) 5 В/дел.

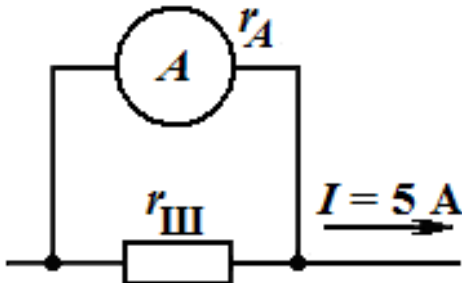


Рис. 2.1.14. Подключение шунта к амперметру

5. Верхний предел измерения амперметра  $I_n = 1$  А, его сопротивление  $r_A$ . Определить сопротивление шунта (рис. 2.1.14), чтобы при токе  $I = 5$  А прибор показывал ток 1 А. Указать правильный ответ.

- а)  $r_{ш} = r A/2$ ; б)  $r_{ш} = r A/3$ ; в)  $r_{ш} = r A/5$ ; 4)  $r_{ш} = r A/4$ .

2. Вольтметром магнитоэлектрической системы с пределом измерения 150 В класса 0,2 были проведены измерения напряжения на резисторах  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  цепи (рис. 2.1.15). Напряжения оказались  $U_1 = 23,5$  В;  $U_2 = 42,3$  В;  $U_3 = 100$  В. Напряжение сети  $U = 220$  В; температура резисторов при измерениях оставалась неизменной. Чем объяснить, что сумма показаний вольтметров не равна напряжению сети? Указать правильный ответ.

- а) погрешностью измерительного прибора;  
б) несоответствием системы измерительного прибора;  
в) малым внутренним сопротивлением вольтметра.

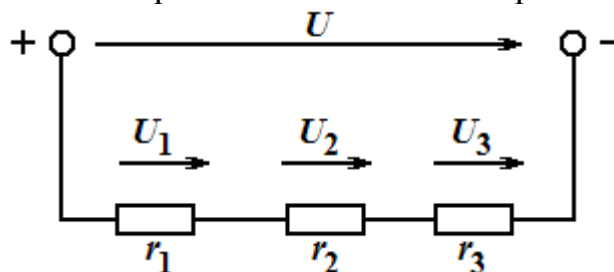


Рис. 2.1.15. Измерение напряжений на резисторах

## 2.2. Электромагнитные устройства и трансформаторы

### *Электромагнитные реле, контакторы, магнитные пускатели*

Электромагнитные устройства (ЭМУ) предназначены для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии в механическую (например, в энергию вращения – в электродвигателях), а также для преобразования параметров электрического тока (в трансформаторах) при передаче энергии на большие расстояния. Промышленностью выпускаются разнообразные ЭМУ постоянного и переменного тока, которые содержат

обмотку возбуждения для создания магнитного поля с требуемыми свойствами.

К ЭМУ постоянного тока относят электромагнитные реле, контакторы, магнитные пускатели, подъемные электромагниты, магнитоэлектрические измерительные механизмы и некоторые электрические машины. На рис. 2.2.1 приведена упрощенная схема реле постоянного тока. Расположенная на сердечнике обмотка включается в управляющую цепь и с ее помощью создается (возбуждается) поле с магнитным потоком  $\Phi$ . Сердечник вместе с подвижной частью – якорем – образует магнитопровод, предназначенный для концентрации магнитного потока.



Рис. 2.2.1. Упрощенная схема реле постоянного тока

Магнитный поток  $\Phi$ , зависящий от тока управления, обуславливает силовое воздействие сердечника на якорь. Последний притягивается к сердечнику и реле срабатывает, контакты управляемой цепи замыкаются, и совершается какое-либо действие, например, включается вентиляция или срабатывает охранная сигнализация. При этом магнитопровод замыкается и магнитный поток удерживает якорь в притянутом состоянии, пока не обесточат обмотку. После отключения реле возвратная пружина вернет якорь в исходное положение и разомкнет управляемую цепь.

Важным параметром реле является чувствительность, т.е. мощность  $P_U$  в цепи управления, при которой оно срабатывает. У высокочувствительных реле  $P_U < 10$  мВт, реле нормальной чувствительности срабатывает при  $P_U = 1 \dots 5$  Вт, реле низкой чувствительности – при  $P_U = 10 \dots 20$  Вт. Мощность  $P_K$  в цепи, которую коммутируют контакты реле, значительно превышает  $P_U$ . Отношение этих мощностей называют коэффициентом усиления (управления) реле:  $K_U = P_U / P_K$ . Значение  $K_U$  у высокочувствительных реле достигает несколько тысяч.

По значению мощности  $P_K$  реле делятся на *сильноточные* ( $P_K$  – более 500 Вт), *нормальной мощности* ( $P_K$  меньше 150 Вт в цепях постоянного тока и менее 500 Вт в цепях переменного тока), и *слаботочные* реле систем автоматики, управления и связи ( $P_K$  менее 50 Вт). Ресурс некоторых реле достиг 200-300 млн. срабатываний за срок службы. Тенденция к уменьшению габаритов ЭМУ обусловила появление миниатюрных герметических контактов (герконов) и реле на их основе, которые по своим размерам сравнимы с полупроводниковыми приборами.

Контакторы – электрические аппараты, предназначенные для включения и отключения силовых цепей (питания электродвигателей). Они сходны с сильноточными реле по конструкции, но отличаются наличием мощных контактов и дугогасительных камер.

Еще более разнообразны ЭМУ переменного тока. К ним относят, кроме уже рассмотренных ЭМУ постоянного тока, дроссели, трансформаторы, магнитные усилители, асинхронные и синхронные электрические машины. Их объединяет использование для выполнения своих функций магнитных полей (МП).

### *Магнитное поле и магнитные материалы*

Под **магнитным полем** (МП) понимают вторую сторону единого электромагнитного поля, создаваемую движущимися электрическими зарядами и магнитными спиновыми моментами носителей магнетизма – электронов, протонов и т.п. частиц в веществах. Оно способно оказывать силовое и индукционное воздействия. В первом случае оно выталкивает проводники с током, а во втором – вызывает появление э.д.с. на концах проводника без тока при движении его в МП.

Магнитное поле характеризуется вектором *магнитной индукции*  $\vec{B}$ . Она определяется как величина, численно равная силе  $F$ , действующей на единицу длины  $l$  проводника, по которому течет ток  $I$ , т.е.:

$$B = \frac{F}{l \cdot I}.$$

Вектор совпадает с направлением магнитного поля (с касательной к силовой линии). Единицей измерения магнитной индукции служит Тесла (Тл):

$$[B] = \left[ \frac{F}{l \cdot I} \right] = \frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{А}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}} \cdot \frac{1}{\text{м} \cdot \text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{м}^2 \cdot \text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{м}^2 \cdot \text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Тл},$$

т.к. В с (вольт-секунда) называется Вебером (1 Вб).

Направление электромагнитной силы  $F$  от проводника с током определяется по *правилу левой руки* (рис. 2.2.2, а). Силовое (электромеханическое) действие МП используется для создания электродвигателей, подъемных

электромагнитов, реле и т.п. устройств. На рис. 2.2.2, б показан принцип действия электродвигателя постоянного тока. Основными частями двигателя являются: неподвижная часть – *статор* и вращающаяся часть – *ротор*.

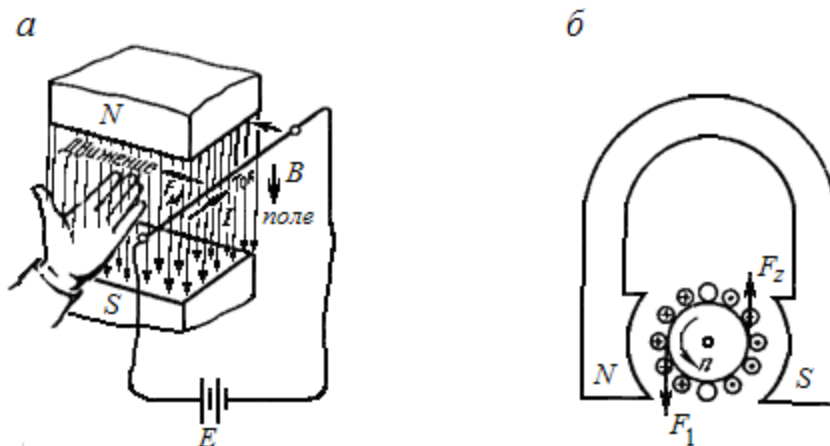


Рис. 2.2.2. Определение направления электромагнитной силы (а), принцип действия электродвигателя постоянного тока (б)

На рис. 2.2.2, б статор выполнен в виде постоянного магнита, а ротор – цилиндра с намотанной на нем обмоткой из проводников. Направление тока в проводнике с током обозначается крестиком, если ток идет от наблюдателя (от нас), и точкой, если ток идет к наблюдателю (на нас). Применяв *правило левой руки*, можно убедиться, что ротор в данном случае будет вращаться против часовой стрелки.

**Пример 2.2.1.** Определить электромагнитную силу, действующую на провод с активной длиной 50 см, по которому течет ток 200 А. Индукция магнитного поля  $B = 1,5$  Тл. Проводник расположен к направлению магнитного поля под углом  $\alpha = 30^\circ$ .

*Решение*

Искомая электромагнитная сила равна:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha = 1,5 \cdot 200 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 75 \text{ Н.}$$

Если во всех точках магнитного поля магнитная индукция имеет одинаковое значение, то такое поле называют *однородным* (равномерным). Другой величиной, характеризующей магнитное поле, является *магнитный поток*. В однородном магнитном поле *магнитный поток* равен произведению вектора магнитной индукции на площадь поверхности, перпендикулярной направлению поля, через которую оно проходит, т.е.  $\Phi = B \cdot S$ . Единицей магнитного потока является Вебер (Вб), причем  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ .

В общем случае *магнитный поток*  $\Phi$  (называемый *поток вектора  $\vec{B}$* )

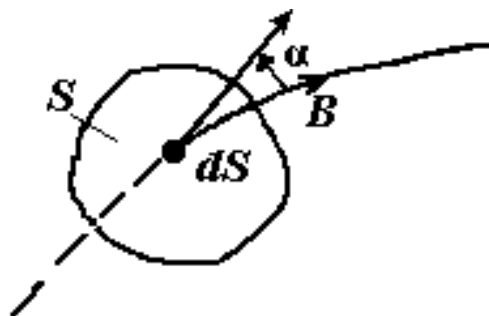


Рис. 2.2.3. Направление вектора  $\vec{B}$

определяется соотношением:  $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cdot S \cos \alpha$  (см. рис. 2.2.2), где  $dS$

и  $S$  – элементарная площадка и полное поперечное сечение материала, которые пронизывает вектор индукции  $\vec{B}$ ;  $\alpha$  – угол между направлением вектора и перпендикуляром (нормалью) к поверхности.

*Индукционное действие МП* выражается в появлении Э.Д.С.  $e$  на концах проводника с длиной  $l$  при перемещении его со скоростью  $v$  в МП с индукцией  $B$ . Она может быть определена по формуле:  $e = B \cdot v \cdot l \cdot \sin \alpha$ , а ее направление – по правилу правой руки. На этом явлении основана работа генераторов, трансформаторов и измерительных приборов. Если МП (индукция  $B$  и магнитный поток  $\Phi$ ) переменное, то э.д.с. индуцируется и в неподвижном проводнике, находящемся в этом поле.

Открыто это явление М.Фарадеем в 1831 г. и заключается в том, что в этом случае э.д.с.  $e$  пропорциональна скорости изменения потокосцепления  $\Psi$  этого контура во времени и, естественно, магнитного потока  $\Phi$  (следовательно, и индукции), т.е.

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - \frac{w \cdot d\Phi}{dt},$$

т.к.  $\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_n = w \cdot \Phi$ ,

где  $w$  – число витков в контуре.

Значение индукции сильно зависит от свойств среды, т.е. материала, в котором создается данное МП. Для определения этой зависимости вводят понятие напряженности МП  $H$  как расчетной величины, определяемой по закону полного тока:  $\oint H dl = \sum I = wI$ , согласно которому интеграл напряженности вдоль замкнутого контура равен алгебраической сумме токов сквозь поверхность, ограниченную этим контуром. Величина напряженности магнитного поля в однородной среде остается постоянной. Если магнитная линия проходит в разных средах, то напряженности поля будут неодинаковыми.

Связь между  $B$  и  $H$  выражается соотношением:  $B = \mu \cdot \mu_0 H$ , где  $\mu \cdot \mu_0 = \mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная проницаемости вакуума (или воздуха), т.е.  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м =  $1,256 \cdot 10^{-6}$  Г/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость магнитопровода, которая указывает на качество магнитного материала.

**Пример 2.2.2.** На расстоянии  $a = 8$  см от оси длинного прямолинейного проводника с током напряженность поля  $H = 8,5$  А/см. Определить ток в проводнике.

*Решение*

Так как магнитное поле прямолинейного проводника с током имеет вид концентрических окружностей, то в качестве контура выберем окружность



с радиусом  $a$ , совпадающую с требуемой магнитной силовой линией. Ее длина равна  $2\pi a$ . Тогда находим:  $I = H \cdot 2\pi a = 8,5 \cdot 6,28 \cdot 8 = 427 \text{ А}$ .

Магнитное поле электромагнита создается под воздействием электрического тока, протекающего по его обмотке. Опытным путем установлено, что интенсивность магнитного поля, т.е. магнитная индукция, прямо пропорциональна силе тока и числу витков катушки. Произведение тока на число витков  $w$  ( $Iw$ ) называют *магнитодвижущей силой* (м.д.с) или *намагничивающей силой* (н.с.), измеряемой в А. Материал, обладающий м.д.с., является источником магнитного поля.

В зависимости от величины  $\mu$  все твердые, жидкие и газообразные вещества делятся на *диамагнитные*, *парамагнитные* и *ферромагнитные*. К *диамагнитным* (медь, цинк, серебро, золото, ртуть, галлий) относятся вещества, у которых  $\mu$  меньше единицы (порядка 0,99), к *парамагнитным* (например, алюминий, платина) относятся вещества, у которых  $\mu$  несколько больше 1 (1,0002—1,0003). У *ферромагнитных* веществ относительная магнитная проницаемость в сотни и тысячи раз больше единицы. Поскольку у диа- и парамагнитных веществ величина  $\mu$  мало отличается от единицы, целесообразно все вещества делить на две группы: ферромагнитные (сталь, никель, кобальт, их сплавы и ферриты) и неферромагнитные (все остальные).

Для вакуума, воздуха и других неферромагнитных веществ можно принять  $B = 1,256 \cdot 10^{-6} H$ .

В ферромагнитных веществах индукция гораздо больше, но зависимость между ней и напряженностью магнитного поля носит сложный характер, т.к. величина относительной проницаемости этих веществ сильно зависит от напряженности магнитного поля. Поэтому при расчетах электромагнитов приходится пользоваться не формулой, а специальными кривыми намагничивания.

Примеры таких кривых для некоторых ферромагнитных материалов приведены на рис. 2.2.4.

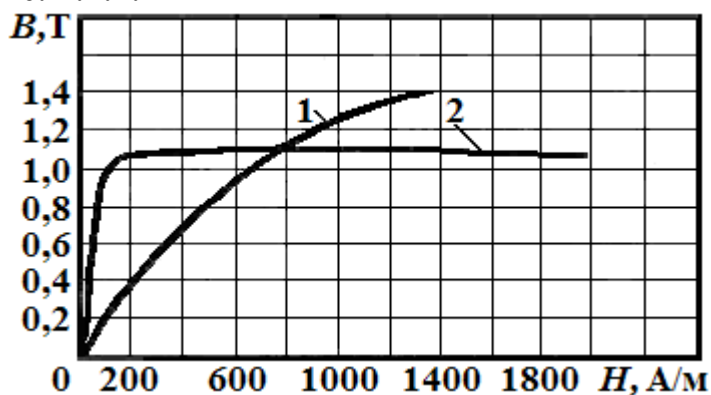


Рис. 2.2.4. Кривые ферромагнитных материалов:

1 — листовая сталь;

2 — пермаллой (сплав железа, никеля и некоторых других материалов)

Характерным для этих кривых является быстрый рост индукции с увеличением напряженности  $H$  поля (а, следовательно, намагничивающей силы) в начальной части кривой и постепенное уменьшение даже прекращение роста индукции, несмотря на возрастание напряженности поля. Это состояние предельной намагниченности ферромагнетика называют *магнитным насыщением*.

Приведенные кривые характерны для процесса намагничивания полностью размагниченных материалов и называются *кривыми первоначального намагничивания*.

Ферромагнетики способны намагничиваться в магнитном поле и создавать магнитное поле внутри. Индукция ферромагнетика равна геометрической сумме векторов  $\vec{B}_I$  и  $\vec{B}_J$  (от м.д.с.  $w \cdot I$  и от намагниченности  $J$ ). Различные ферромагнитные материалы проводят магнитный поток  $\Phi$  по-разному. Основной их характеристикой является петля магнитного гистерезиса  $B(H)$ . Она определяет значение  $B$ , которое создается в сердечнике из этого материала при воздействии некоторой  $H$  (рис. 2.2.5). При этом  $H_{\max}$  и  $B_{\max}$  – напряженность и индукция насыщения материала, а  $H_C$  и  $B_r$  – его коэрцитивная сила и остаточная индукция, соответственно.

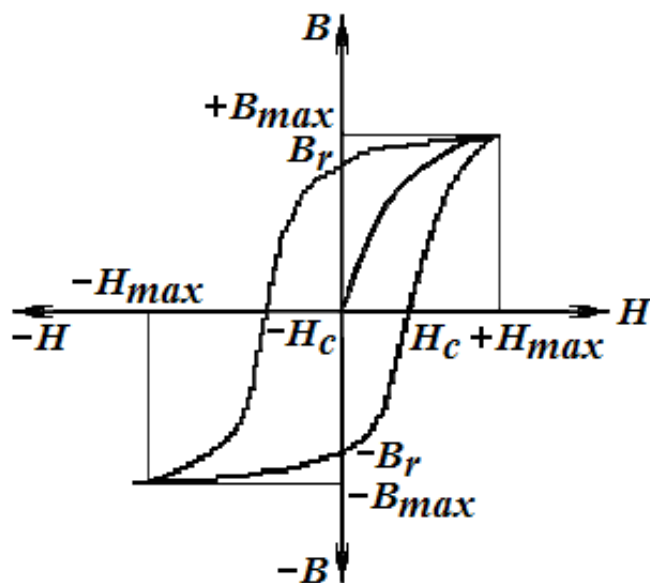


Рис. 2.2.5. Петля магнитного гистерезиса

Узкая петля (малая  $H_C$ ) характерна для **магнитомягких** материалов (электротехническая сталь, сплав пермаллой), которые используются для изготовления трансформаторов. Им присущи малые потери на перемагничивание.

*Магнитомягкие* ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса прямоугольной формы (малая  $H_C$  и большая  $B_r$ ) используются в качестве запоминающих устройств в вычислительной технике и автоматике.

Широкая петля (большие  $H_C$  и  $B_r$ ) принадлежит **магнитотвердым** материалам, из которых изготавливаются постоянные магниты (сплавы

железа с алюминием, никелем, хромом типа ЮНД или ЮНДК, сплав самария с кобальтом). После воздействия на них магнитного поля они сохраняют намагниченность и служат его источниками. Для каждого ферромагнетика существует точка Кюри (критическая температура), при которой он теряет магнитные свойства (для железа это 768 °С). Силу тяги электромагнита (притяжения его якоря) можно определить по формуле

$$F = \frac{B^2 S}{4\mu_0},$$

где  $S$  – площадь полюса магнита. Если  $B$  в Тл,  $\mu_0$  – в Гн/м,  $S$  – в м<sup>2</sup>, то  $F$  будет в ньютонах. Для реализации магнитных свойств создаются магнитные цепи.

### *Магнитные цепи.*

#### *Законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей*

Совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела и образующих замкнутый участок, в котором при наличии м.д.с. образуется магнитный поток  $\Phi$  и вдоль которого замыкаются линии магнитной индукции  $B$ , называют *магнитной цепью* (МЦ). Таким образом, она служит для получения в некотором объеме магнитного поля и состоит из магнитопровода и обмотки возбуждения.

МЦ так же как и ЭЦ, делятся на неразветвленные (простые) и разветвленные (сложные) и для них тоже справедливы понятия: *ветвь*, *узел* и *контур*.

При расчете МЦ определяют м.д.с.  $wI$ , необходимую для создания в каком-либо участке магнитопровода заданного магнитного потока  $\Phi$ . Этот поток аналогичен току  $I$  в ЭЦ, а м.д.с.  $wI = Hl$  – эквивалентна магнитному напряжению  $U_M$  (по аналогии с ЭЦ), т.к. именно она возбуждает  $\Phi$ .

Рассмотрим неразветвленную МЦ (рис. 2.2.6), которая состоит из двух участков, причем  $l_i$  и  $S_i$  – длины и площади поперечных сечений участков магнитопровода, соответственно.

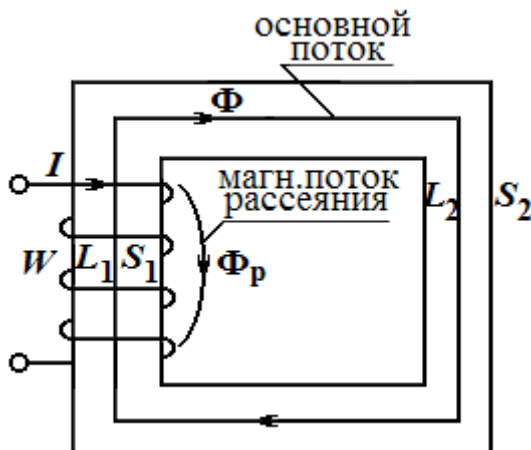


Рис. 2.2.6. Неразветвленная магнитная цепь

Пусть  $B_i = \text{const}$  на каждом участке МЦ. Так как  $B_1 = \Phi/S_1$ , а  $B_2 = \Phi/S_2$ , то напряженности магнитного поля в участках магнитопровода равны:

$$H_1 = \frac{B_1}{\mu_1 \cdot \mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_1 \cdot \mu_0 \cdot S_1}; \quad H_2 = \frac{\Phi}{\mu_2 \cdot \mu_0 \cdot S_2}.$$

Выделим контур в МЦ, который пусть совпадает со средней линией  $L_{\text{ср}}$ . По закону полного тока для него имеем:

$$\begin{aligned} F = H_1 l_1 + H_2 l_2 = I \cdot w = \Phi \left( \frac{l_1}{\mu_1 \cdot \mu_0 \cdot S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 \cdot \mu_0 \cdot S_2} \right) = \\ = \Phi \cdot R_{M1} + \Phi \cdot R_{M2} = U_{M1} + U_{M2}, \end{aligned}$$

где  $R_{Mi}$  – **магнитные сопротивления** участков МЦ, причем единицей измерения их является  $1/\Gamma$ , т.к.  $[R_M] = A/B \cdot c = 1/\text{Ом} \cdot c = 1/\Gamma$ .

Выражение:  $\Phi = \frac{I \cdot w}{R_{M1} + R_{M2}}$  называют **законом Ома** для МЦ.

В разветвленных МЦ (рис. 2.2.7) выражение:  $\sum_{i=1}^K \Phi_i = 0$  называют **1-м законом Кирхгофа**, а выражение:  $\sum_{K=1}^N R_{MK} \cdot \Phi_K = \sum_{K=1}^N H_K \cdot l_K$  – **2-м законом Кирхгофа** для МЦ.

При указанных на рис. 2.2.6 направлениях магнитных потоков по первому закону имеем:  $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$ , а по закону полного тока для контура МЦ при обходе по часовой стрелке получим:  $\oint H \cos \alpha dl = I_1 w_1 - I_2 w_2$ , которое при разбиении контура на участки с одной и той же площадью поперечного сечения приводится к виду:

$$H_1 l_1 + H_{P1} l_{P1} + H_4 l_4 - H_2 l_2 - H_{P2} l_{P2} - H_5 l_5 = I_1 w_1 - I_2 w_2.$$

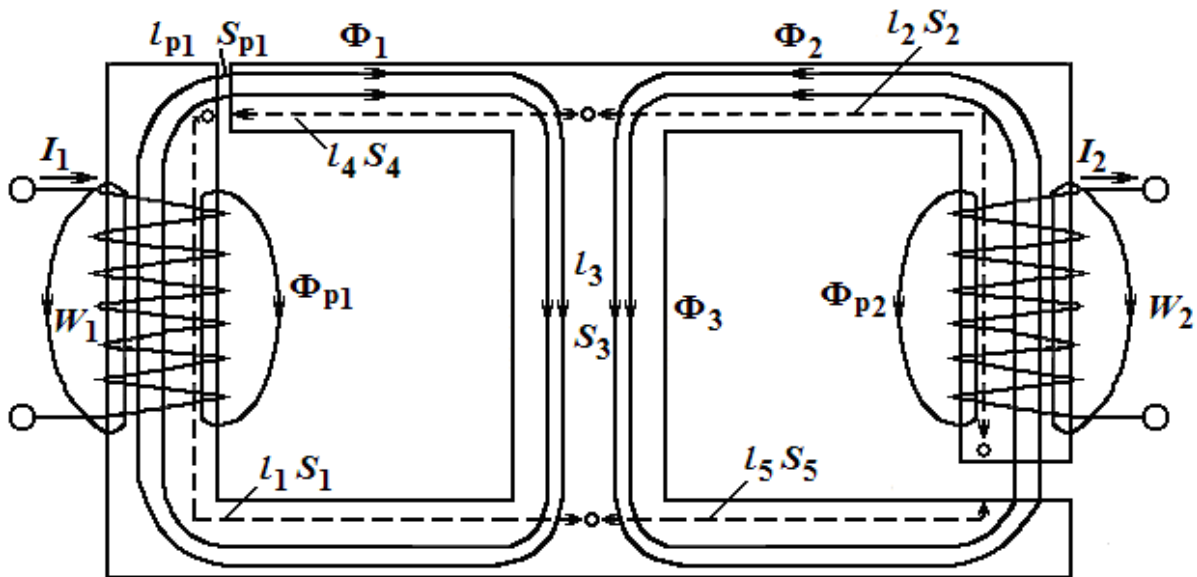


Рис. 2.2.7. Разветвленная магнитная цепь

Отсюда можно сделать вывод: в любом замкнутом контуре МЦ алгебраическая сумма произведений напряженностей на длины соответствующих участков равна алгебраической сумме намагничивающих сил или результирующей м.д.с. Поскольку закон полного тока для любого замкнутого контура МЦ можно записать в общем виде так:

$$\sum H \cdot l = \sum I \cdot w,$$

а величину  $HI$  называют **магнитным напряжением**  $U_M$ , то последнее выражение можно считать еще одной формой 2-го закона Кирхгофа для МЦ. Следует отметить, что индуктивность  $L$  катушки сильно зависит от материала сердечника (магнитопровода) и определяется (подобно емкости плоскостного конденсатора) по формуле

$$L = \frac{\mu_a w^2 S}{l} = \frac{\mu \mu_0 w^2 S}{l},$$

где  $S$  и  $l$  – площадь сечения и длина катушки, соответственно.

### *Однофазные трансформаторы:*

*назначение, устройство, принцип действия и режим работы*

*Трансформатор* – электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменных напряжений и токов при передаче электрической энергии от источника к потребителю. Он позволяет передать одну и ту же мощность при различных напряжениях и токах, т.к.

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2 = \text{const.}$$

Трансформация напряжений и токов необходима с точки зрения экономичности и целесообразности. Мощность ГЭС составляет 2...5 млн кВт при  $U_{\Gamma} = 24$  кВ. Токи в линии электропередачи (ЛЭП) при передаче такой мощности и напряжении  $U_{\text{пер}} = U_{\Gamma} = 24$  кВ могут достичь 50...120 кА. Такие ЛЭП требуют очень толстых медных проводов и неэкономичны из-за больших потерь.

С повышением  $U_{\text{пер}}$  до 500, 750 и 1150 кВ резко снижаются токи в ЛЭП, уменьшаются сечения проводов и потери в них. Но в конце ЛЭП необходимо понизить напряжение до 35, 10 или 6 кВ. Трансформаторы рассчитывают на нормальную работу только при определенных значениях частоты, мощности, тока и напряжения, называемых **номинальными**. Современной промышленностью выпускаются трансформаторы с  $P_{\text{ном}} = 1 \text{ ВА} \dots 1000000 \text{ кВА}$ . Они позволяют «развязать» цепи питания и нагрузки, что увеличивает живучесть энергосистем и широко используется, например, при сварке, нагреве, при измерении больших токов или напряжений, испытании изоляции.

Все трансформаторы имеют замкнутый стальной сердечник (рис. 2.2.8) – магнитопровод – с двумя и более обмотками на нем. Обмотки бывают первичные и вторичные, а также низкого и высокого напряжения (НН и ВН, соответственно). Магнитопровод собирают из тонких пластин или лент электротехнической стали с хорошей  $\mu$  и малыми удельными потерями от гистерезиса и вихревых токов.

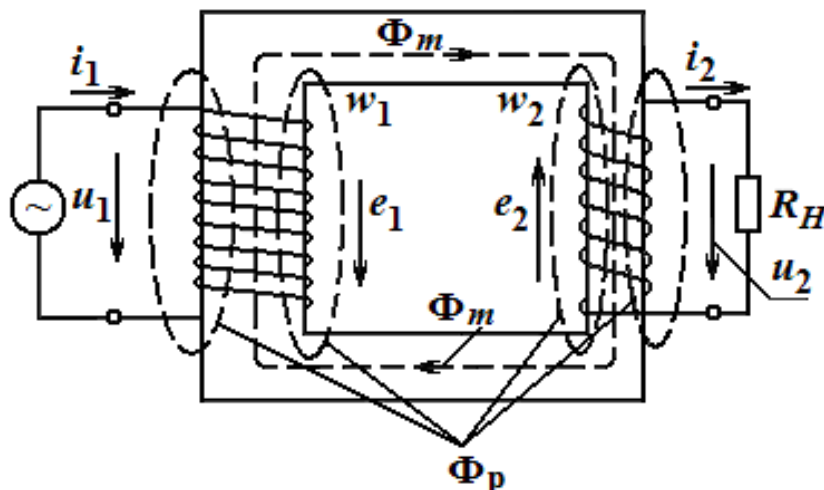


Рис. 2.2.8. Конструкция однофазного трансформатора

Работает трансформатор следующим образом. Переменное напряжение  $u_1(t)$  вызывает в первичной обмотке  $w_1$  переменный ток  $i_1$ , который возбуждает переменный магнитный поток  $\Phi(t)$ . Его основная часть –  $\Phi_m$  – замыкается по магнитопроводу и сцепляет магнитно-первичную обмотку со вторичной  $w_2$ .

Небольшая часть  $\Phi$ , т.е.  $\Phi_p$  замыкается вокруг первичной обмотки по воздуху, не достигая вторичной обмотки. Эта часть поля создает потокосцепление рассеяния  $\Psi_{p1}$  первичной обмотки.

Переменный основной поток  $\Phi(t)$  создает в обмотках э.д.с.:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \text{ причем } \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При синусоидальном  $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$  действующие значения трансформаторных Э.Д.С. связаны с амплитудой основного потока  $\Phi_m$  формулами:

$$E_1 = \omega \cdot w_1 \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f \cdot w_1 \cdot \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44 f \cdot w_2 \Phi_m.$$

Отношение Э.Д.С. обмотки ВН к э.д.с. обмотки НН называется коэффициентом трансформации:

$$n = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} > 1.$$

Э.д.с.  $\dot{E}_2$  создает ток  $\dot{I}_2$  (если цепь вторичной обмотки замкнута) и вырабатывает напряжение  $\dot{U}_2$ . Ток  $\dot{I}_2$  создает в магнитопроводе свой магнитный поток, направленный навстречу  $\Phi$  первичной обмотки. Но поскольку амплитуда  $\Phi$ , создаваемой напряжением  $\dot{U}_1 = \text{const}$ , должна оставаться неизменной, то возрастает ток  $\dot{I}_1$  в первичной обмотке, компенсируя размагничивающее действие тока  $\dot{I}_2$ . Отсюда вытекает соотношение между этими токами:  $I_1 = \frac{I_2 U_2}{U_1}$ . Таким образом, любые изменения нагрузки

будут отражаться на значении входного тока, однако выходная обмотка электрически не связана с входной обмоткой (они связаны только магнитно), что гарантирует хорошую электробезопасность при нормальной эксплуатации. Рассмотрим возможные режимы работы трансформаторов.

**Режим холостого хода.** Это испытательный режим (рис. 2.2.9), для получения которого на первичную обмотку необходимо подать  $\dot{U}_{1\text{ном}}$ , а вторичную обмотку разомкнуть и обеспечить, таким образом  $I_2 = 0$ .

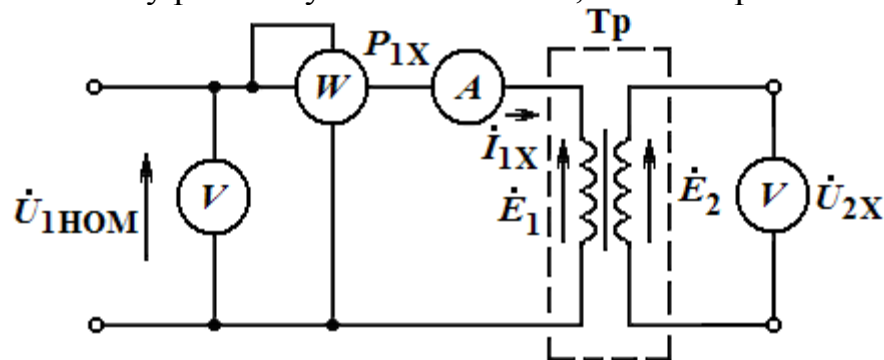


Рис. 2.2.9. Режим холостого хода трансформатора

Измерительные приборы при этом покажут, что в первичной обмотке течет небольшой ток *холостого хода*  $\dot{I}_{1X}$ , во вторичной обмотке имеется напряжение  $U_{2X}$  и трансформатор потребляет из сети электроэнергию, мощность которой называют **потерями холостого хода**  $P_{1X}$ . По ним находят:

$$\cos \varphi_X = \frac{P_{1X}}{U_{1X} I_{1X}}; \quad n_{Tp} = \frac{U_{1X}}{U_{2X}}; \quad \delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_X,$$

где  $\delta$  – угол потерь в первичной обмотке между направлениями векторов  $\Phi$  и тока  $\dot{I}_{1X}$ ;

$\varphi_X$  – угол сдвига по фазе между векторами напряжения и тока в первичной обмотке.

Эквивалентная схема трансформатора в этом режиме имеет вид, приведенный на рис. 2.2.10.

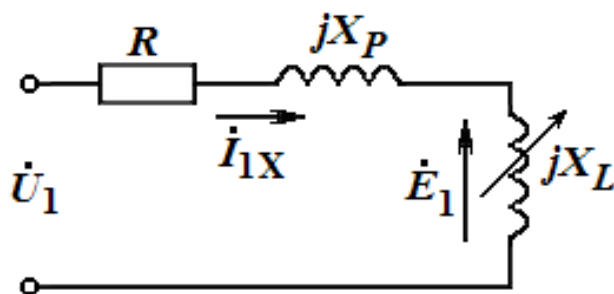


Рис. 2.2.10. Эквивалентная схема трансформатора в режиме холостого хода

Она содержит активное сопротивление  $R_1$  первичной обмотки и две катушки: одна – линейная с индуктивным сопротивлением рассеяния  $jX_P$ , а вторая нелинейная с ферромагнитным магнитопроводом, в которой основной поток наводит э.д.с.  $E_1$ , а в магнитопроводе возникают потери энергии. При синусоидальном потоке  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  наводимые в обмотках э.д.с.  $e_1$  и  $e_2$  также синусоидальны и отстают по фазе от магнитного потока на угол  $\frac{\pi}{2}$ :

$$e_1 = w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right);$$

$$e_2 = w_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Из рис. 2.2.9 и 2.2.10 вытекают следующие уравнения состояния первичной и вторичной цепей, составленные по 2-му закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_P)\dot{I}_{1X} \approx -\dot{E}_1,$$

$$\dot{U}_{2X} = \dot{E}_2.$$

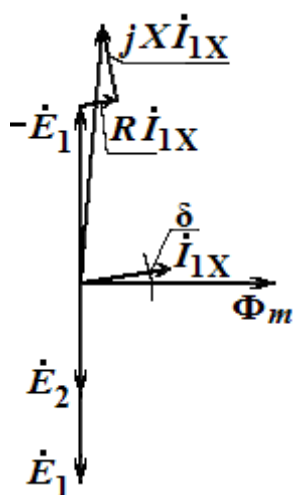


Рис. 2.2.11. Векторная диаграмма для режима холостого хода трансформатора

Эти выражения позволяют построить векторную диаграмму трансформатора, работающего в режиме холостого хода (рис. 2.2.11).

Сначала на комплексной плоскости откладывают амплитуду магнитного потока  $\Phi_m$ , затем строят вектор тока  $\dot{I}_{1X}$ , опережающего  $\Phi_m$  на угол потерь  $\delta$  и векторы  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ , отстающие на  $90^\circ$ . Далее изображают вектор  $-\dot{E}_1$  и прибавляют геометрически к нему векторы  $R_1\dot{I}_{1X}$  и  $jX_P\dot{I}_{1X}$ . Их сумма дает вектор  $\dot{U}_1$ .



Исследования показали, что ток  $\dot{I}_{1X}$  очень мал (до 5% от номинального). Поэтому очень малы падения напряжений на  $R_1$  и  $jX_P$  от этого тока. Следовательно, ими можно пренебречь и выражения для трансформаторных э.д.с. упрощаются:  $\dot{U}_{1X} \approx -\dot{E}_1$  и  $\dot{U}_{2X} = \dot{E}_2$ . Поэтому по измеренным напряжениям в режиме холостого хода можно точно определить значение коэффициента трансформации  $n_{Tp} = \frac{U_{1X}}{U_{2X}}$ , а по мощности  $P_{1X}$  потерь судить

о величине потерь энергии в стали магнитопровода, т.е.  $P_{1X} = P_{ст}$ . Этот параметр информирует о качестве изготовления или сборки сердечника трансформатора.

**Режим короткого замыкания в трансформаторе.** Для испытания обмоток трансформатора создают режим *опытного короткого замыкания* (КЗ) – при малом напряжении и номинальных токах обмоток. Вторичную обмотку при этом замыкают накоротко (рис. 2.2.12, а), а к первичной подводят такое  $U_{1K}$ , при котором получают  $I_{1ном}$  и  $I_{2K} \approx I_{2ном}$  ( $U_{1K} \approx 2...8\%$  от  $U_{1ном}$ ). Значение  $U_{1K}$  записывается в паспорт и используется для определения эксплуатационных качеств. Так как при КЗ во вторичной обмотке трансформатор не передает энергии приемнику, а магнитный поток в сердечнике очень мал, то активная мощность, измеряемая ваттметром, является мощностью *потерь энергии в проводах обмоток (потери в меди  $P_{1м}$ )*. Величина  $P_{1м}$  тоже является паспортным параметром трансформатора. По измеренным данным находят:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1K}}; \quad n_{Tp} = \frac{I_{2K}}{I_{1K}};$$

где  $\varphi_K$  – угол сдвига по фазе между векторами  $E_1$  и  $I_1$ ;

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}};$$

$$R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2} \text{ и } X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}.$$

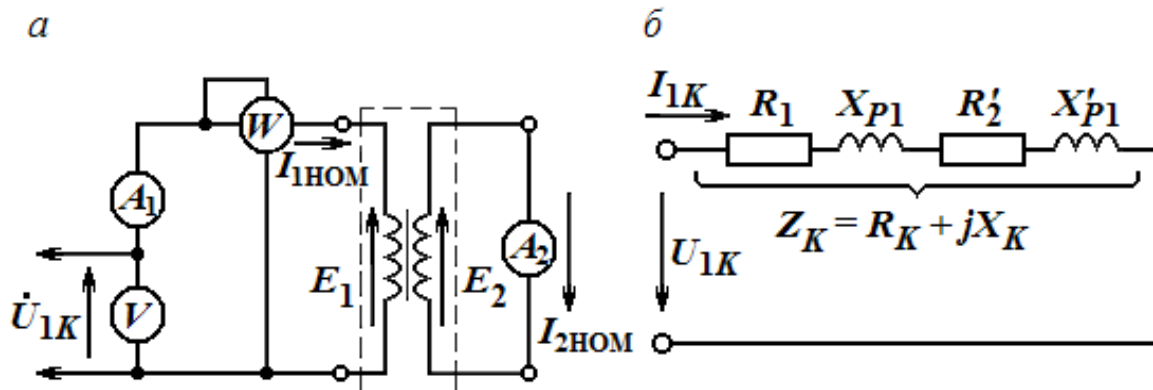


Рис. 2.2.12. Режим короткого замыкания трансформатора (а), эквивалентная схема трансформатора в этом режиме (б)

Эквивалентная схема трансформатора в режиме КЗ приведена на рис.

2.2.12, б, где обозначены  $R_1$ ,  $R'_2 = R_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2$  – активные сопротивления обмоток, причем  $R'_2$  – приведенное к входу значение  $R_2$ ;  $X_{P1}$  и  $X'_{P2} = X_{P2} \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2$  – реактивные составляющие сопротивлений обмоток, связанные с рассеиванием магнитного потока. При этом считается, что  $R'_K = R_1 + R'_2$  и  $X_K = X_{P1} + X'_{P2}$ .

Входное сопротивление  $Z_K$  трансформатора со стороны сети называют сопротивлением короткого замыкания. Это линейное активно-индуктивное сопротивление, активная составляющая которого, т.е.  $R_K$  обусловлена сопротивлением проводов обмоток, а реактивная составляющая  $X_K$  – индуктивным сопротивлением, вызванным магнитными полями рассеяния обмоток. Поскольку значение  $U_{1K}$  невелико, то и сопротивление  $Z_K$  мало.

Потокосцепление рассеяния возрастают с увеличением объема обмоток и изоляционных расстояний между ними. Поэтому в трансформаторах большой мощности обычно  $X_K > R_K$ , а в маломощных – наоборот.

**Режим нагрузки (рабочий режим) трансформатора.** В этом режиме первичная обмотка включается на номинальное напряжение, а к вторичной подключается приемник. При этом э.д.с.  $E_2$  создает ток в цепи вторичной обмотки.

Магнитный поток в магнитопроводе создается одновременным действием токов двух обмоток, причем амплитуда основного потока практически не меняется, т.е. не зависит от нагрузки. Отсюда следует, что  $E_1 \approx U_1 \approx \text{const}$  и  $\Phi_m = E_1 / 4,44 \cdot f \cdot w_1 \approx \text{const}$  при изменении токов обмоток.

Эквивалентная схема трансформатора в режиме нагрузки приведена на рис. 2.2.13, из которого следуют такие уравнения состояния:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_{P1})\dot{I}_1,$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - (R_2 + jX_{P2})\dot{I}_2.$$

Исследования показали, что  $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_{1X} + \dot{I}'_2$ , где  $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ .

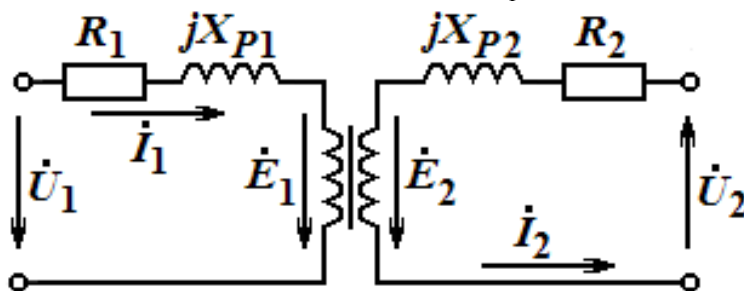


Рис. 2.2.13. Эквивалентная схема трансформатора в режиме нагрузки

Это означает, что ток первичной обмотки содержит две составляющие: намагничивающую (равна току холостого хода) и нагрузочную (называемую приведенным током нагрузки). Полученные выражения позволяют построить векторную диаграмму работы трансформатора в режиме нагрузки. Она изображена на рис. 2.2.14 с поворотом на угол  $90^\circ$  по часовой стрелке.

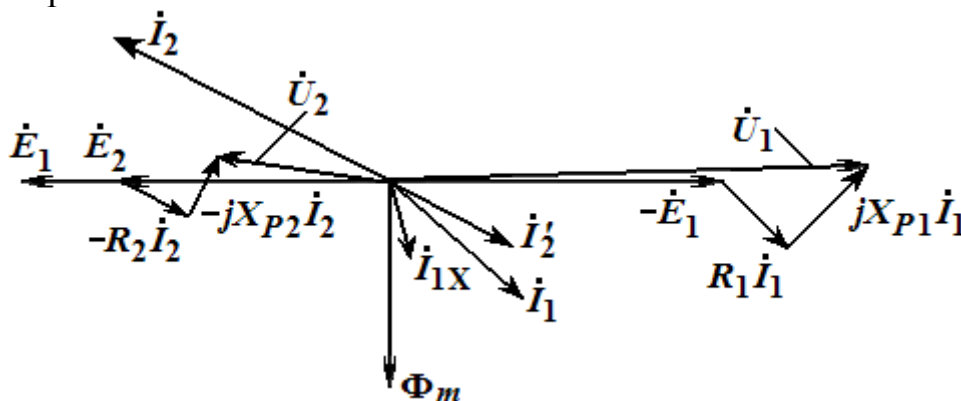


Рис. 2.2.14. Векторная диаграмма трансформатора в режиме нагрузки

Работа трансформатора под нагрузкой сопровождается увеличением потерь энергии по сравнению с режимом холостого хода. Кроме  $P_{ст}$  (мощности потерь в магнитопроводе), которая не зависит от токов в обмотках, возникают потери энергии в самих обмотках, пропорциональные квадрату тока в них. При эксплуатации трансформатора могут возникать *короткие замыкания* (КЗ) со стороны приемника, которые создают аварийный режим со стороны сети. При КЗ на стороне приемника в трансформаторе возникают токи, ограничиваемые только сопротивлением обмоток  $Z_K$ . Формула для расчета тока короткого замыкания в первичной обмотке при КЗ в приемнике имеет вид:

$$I_{1K} = \frac{100}{u_K \% } I_{ном},$$

где  $u_K\%$  – первичное напряжение, подводимое в опыте короткого замыкания для получения номинальных значений токов в обмотках, выраженное в процентах от  $U_{ном}$ . Например, у трансформатора с  $u_K = 2,5\%$  установившийся ток КЗ будет больше номинального в 40 раз. Знание тока КЗ необходимо для выбора защиты трансформатора.

### Специальные типы трансформаторов

К специальным типам трансформаторов относят *автотрансформаторы* и *измерительные трансформаторы* (напряжения и тока). *Автотрансформатор* отличается от обычного трансформатора тем, что первичная и вторичная обмотки электрически соединены, вследствие чего энергия передается не только магнитным полем, но и электрическим путем.

Благодаря этому он имеет меньшие габариты и массу, а также меньшие потери при одной и той же мощности.

Следовательно, он экономичнее и выгоднее трансформатора. На рис. 2.2.15 приведены упрощенные схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов.

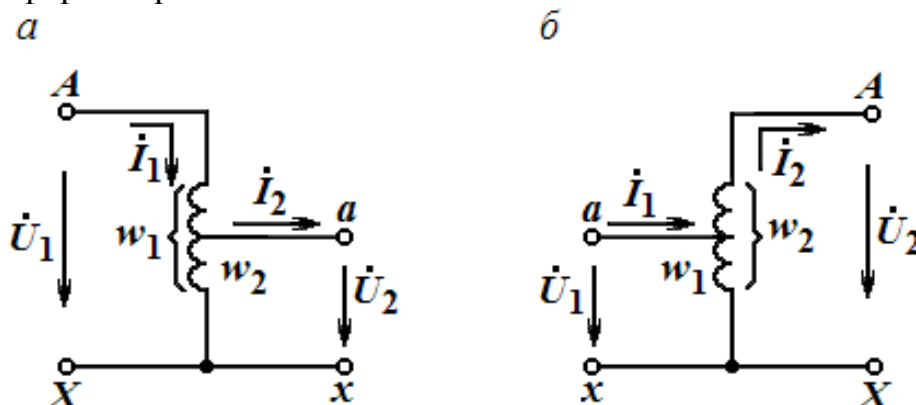


Рис. 2.2.15. Упрощенные схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов

Пусть к первичной обмотке приложено напряжение  $U_1$ , которое создает в обмотке с числом витков  $w_1$  намагничивающий ток; в магнитопроводе возбуждается магнитный поток, индуцирующий э.д.с.  $E_1=U_1$  в первичной обмотке и э.д.с.  $E_2 = U_2$  во вторичной обмотке с числом  $w_2$  витков.

Отношение  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = n$  является коэффициентом трансформации. В

понижающем автотрансформаторе  $n>1$ , а в повышающем  $n<1$ . Номинальная мощность автотрансформатора  $S_{1\text{ном}}=U_{1\text{ном}} \cdot I_{1\text{ном}} = U_{2\text{ном}} \cdot I_{2\text{ном}}$ . Часть этой мощности передается электрически – от зажима А к зажиму а (рис. 2.2.15, а) или от зажима а к зажиму А (рис. 2.2.15, б) в приемник, а часть – электромагнитным полем между частями обмоток с числами витков от  $(w_1-w_2)$  к  $w_2$  в понижающем автотрансформаторе или от  $w_1$  к  $(w_2-w_1)$  в повышающем.

Размеры магнитопровода и обмоток трансформаторов зависят от их электромагнитной мощности  $S_T$ , которая для приведенных на рис. 2.2.14 вариантов равна, соответственно:

$$S_T^{\text{ПОН}} = (U_1 - U_2) I_1 = U_1 I_1 \left( 1 - \frac{1}{n} \right) = k_B S_0;$$

$$S_T^{\text{ПОВ}} = U_1 (I_1 - I_2) = S_0 (1 - n) = k_B S_0,$$

где  $k_B$  – называют коэффициентом выгодности автотрансформатора; причем  $k_B = 1 - 1/n$  при  $n > 1$  и  $k_B = 1 - n$  при  $n < 1$ . В обоих случаях  $k_B < 1$ . Он показывает, какая часть передаваемой номинальной мощности  $S_{0\text{ном}}$  автотрансформатора составляет его электромагнитная или расчетная мощность. В мощных автотрансформаторах это дает большой экономический эффект,

однако следует помнить о мерах электробезопасности при работе с ними, поскольку обмотки соединены между собой электрически. Рассмотрим особенности **измерительных трансформаторов**, которые подразделяются на *трансформаторы напряжения* и *трансформаторы тока*.

Эти трансформаторы применяются для расширения пределов измерения приборов переменного тока: амперметров, вольтметров, ваттметров, счетчиков энергии, фазометров, частотомеров и т.п. Одновременно они изолируют измерительные приборы от цепей высокого напряжения или большого тока, в которых производится измерение. Измерительные приборы подключаются к вторичным обмоткам этих трансформаторов. На рис. 2.2.16 показана схема включения измерительных приборов в однофазную цепь через трансформаторы напряжения и тока.

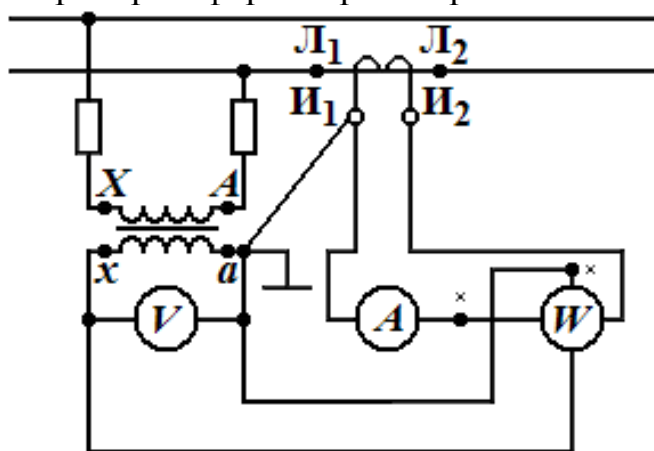


Рис. 2.2.16. Схема включения измерительных приборов в однофазную цепь

Для правильного включения ваттметров и других фазочувствительных приборов обмотки **трансформаторов напряжения** маркируют аналогично силовым трансформаторам:  $A - X$ ,  $a - x$ . Зажимы обмотки трансформатора тока, включаемой в линию, обозначают  $Л_1 - Л_2$ . Вторичные зажимы (измерительную цепь) обозначают  $И_1 - И_2$ . Один зажим вторичных обмоток измерительных трансформаторов и металлические корпуса приборов заземляют для обеспечения безопасности прикосновения к ним обслуживающего персонала даже в случае пробоя изоляции между обмотками. Измеряемое первичное напряжение  $U_1$  определяют по показанию вольтметра  $U_2$  и коэффициенту трансформации трансформатора напряжения  $K_U > \frac{1}{U_1} = K_U U_2$ , а измеряемый ток в линии  $I_1$  – по показанию амперметра  $I_2$  и коэффициенту трансформации тока  $K_I > \frac{1}{I_1} = K_I I_2$ .

Вторичные обмотки измерительных трансформаторов напряжения рассчитаны на номинальное напряжение 100 В, а трансформаторов тока – на номинальные токи 5 или 10 А. Для обеспечения требуемой точности

измерения погрешности измерительных трансформаторов нормированы ГОСТами. Пределы их погрешностей соответствуют классам точности, например, в трансформаторах класса 0,2 допускается погрешность измерения напряжения или тока  $\pm 0,2\%$  от номинала  $\pm 10'$  по углу. Трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к режиму холостого хода.

**Трансформатор тока** существенно отличается от трансформатора напряжения. Его первичной обмоткой часто служит один провод с током ( $w_1=1$ ), а вторичная обмотка имеет 100-200 витков. Он повышает напряжение и понижает ток. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в цепь измеряемого тока. Вторичная обмотка замкнута на токовые цепи амперметра, ваттметра и других приборов, включенных последовательно и имеющих малое сопротивление. Поэтому номинальным режимом измерительного трансформатора тока является режим, близкий к короткому замыканию (когда  $U_2 \approx 0$ ). Несоблюдение номинальных режимов ведет к увеличению погрешности, т.к. изменяется коэффициент трансформации.

Следует заметить, что режим холостого хода (с разомкнутой вторичной обмоткой) является аварийным для трансформатора тока, т.к. большой ток первичной обмотки вызовет сильное намагничивание магнитопровода и его насыщение. В результате резко увеличивается мощность потерь и происходит перегрев магнитопровода. От большого магнитного потока во вторичной обмотке индуцируется большая э.д.с. (до 1 кВ), опасная для жизни, поэтому на случай переключения трансформаторов тока в них предусматриваются специальные замыкатели вторичной обмотки накоротко.

К специальным трансформаторам можно отнести также и **трехфазные трансформаторы**, которые давно уже не представляют собой простую совокупность (группу) трех однофазных трансформаторов. Они имеют общий трехстержневой магнитопровод с обмотками, относящимися к одной фазе на каждом стержне. Все стержни располагаются в одной плоскости. Поэтому специальный трехфазный трансформатор имеет меньшие габариты, объем магнитопровода и стоимость, чем трехфазная группа.

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Рассчитать параметры магнитной цепи для магнитопровода, схема которого приведена на рис. 2.2.17. Все размеры даны в миллиметрах. Материал магнитопровода – сталь электротехническая, кривая намагничивания которой также приведена на рис. Количество витков в обмотке 300. Магнитная индукция в воздушном зазоре ( $\delta = 0,5$  мм) должна быть равна  $B_B = 1,2$  Т.

*Решение*

1) Наносим на чертеж приближенно среднюю магнитную линию и определяем длину ее в сердечнике:

$$l_C = 120 + 120 + 220 + 220 = 680 = 0,68 \text{ м.}$$

2) Площадь поперечного сечения магнитопровода равна

$$S_C = 40 \cdot 30 = 1200 \text{ мм}^2 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

3) Площадь поперечного сечения воздушного зазора аналогична:

$$S_B = S_C = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

4) Определяем магнитный поток в воздушном зазоре при  $B_B = 1,2 \text{ Т}$ :

$$\Phi_B = B_B S_B = 1,2 (1,2 \cdot 10^{-3}) = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

5) Предполагая, что магнитный поток на всех участках магнитопровода одинаков, и учитывая, что  $S_B = S_C$ , получаем  $B_C = 1,2 \text{ Т}$ .

6) По кривой намагничивания (рис. 2.2.17) определяем величину напряженности магнитного поля в сердечнике при  $B_C = 1,2 \text{ Т}$ . Принимаем  $H_C = 900 \text{ А/м}$ .

7) Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре равна:

$$H_B = \frac{B_B}{\mu_0} = \frac{1,2}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 960 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

8) Зная напряженность магнитного поля, на каждом участке на основании закона полного тока определяем намагничивающую силу:

$$I\omega = H_C l_c + H_B \delta = 900 \cdot 0,68 + 960 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 1092 \text{ А}.$$

9) Определяем намагничивающий ток в обмотке:

$$I = \frac{I\omega}{\omega} = \frac{1092}{300} = 3,64 \text{ А}.$$

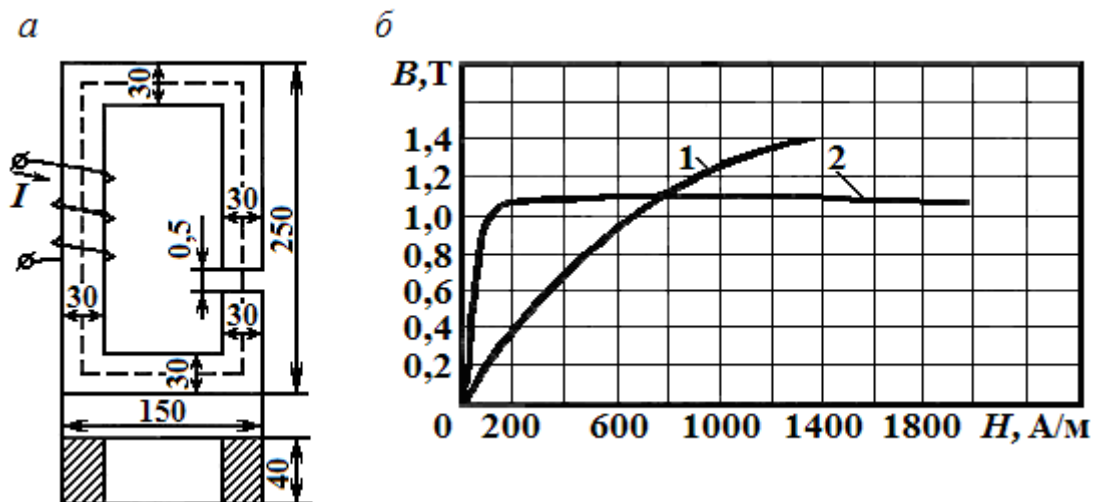


Рис. 2.2.17. Схема магнитопровода (а);  
кривые намагничивания ферромагнитных материалов (б):  
1 – листовая сталь; 2 – пермаллой

2. По паспортным данным и результатам осмотра однофазного двухобмоточного трансформатора установлено, что число витков первичной обмотки  $w_1 = 424$ , число витков вторичной обмотки  $w_2 = 244$ , действительное сечение сердечника  $S_d = 28,8 \text{ см}^2$ ; 10 % приходится на изоляцию пластин, активное сопротивление первичной обмотки  $R_1 = 1,2 \text{ Ом}$ , вторичной обмотки  $R_2 = 1,4 \text{ Ом}$ , потери холостого хода составляют 1 % от номинального значения потребляемой мощности, напряжение на первичной обмотке  $U_1 = 220 \text{ В}$ , активный ток первичной обмотки  $I_1 = 2,95 \text{ А}$ , ток холостого хода 5 % от  $I_{\text{ном}}$ . Определить амплитудное значение магнитной индукции, э.д.с. вторичной обмотки, электрические и магнитные потери, номинальный к. п. д.

*Решение*

Приближенно можно считать, что э.д.с. первичной обмотки равна напряжению питающей сети, т.е.  $U_1 = E_1 = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot w_1$ . Отсюда определяем магнитный поток:

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 \cdot 50 \cdot 424} = 0,0023 \text{ Вб.}$$

Активное сечение стали определяем, как разность между действительным сечением стали и сечением изоляции:

$$S_a = S_d - S_{\text{из}} = 28,8 - 0,1 \cdot 28,8 \approx 26 \text{ см}^2 = 26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Амплитудное значение магнитной индукции:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_a} = \frac{0,0023}{26 \cdot 10^{-4}} = 0,88 \text{ Тл.}$$

Коэффициент трансформации:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{424}{244} = 1,73.$$

Отсюда э.д.с. вторичной обмотки:

$$E_2 = \frac{E_1}{n} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ В.}$$

Абсолютное значение тока холостого хода:

$$I_X = 5\% I_{\text{ном}} = 0,05 \cdot 2,95 = 0,147 \text{ А.}$$

Электрические потери трансформатора:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 2,95^2 \cdot 1,2 + 4,85^2 \cdot 1,4 = 43,3 \text{ Вт.}$$

Магнитные потери:

$$P_M = P_X = 1\% P_1 = 0,01 \cdot 220 \cdot 2,95 = 6,5 \text{ Вт.}$$



Сумма потерь:

$$\sum P = P_{\Sigma} + P_M = 43,3 + 6,5 = 49,8 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке:

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{(220 \cdot 2,95) - 49,8}{220 \cdot 2,95} = 0,92.$$

## 2.3. Электрические машины постоянного тока

### *Общее устройство и области применения электрических машин постоянного тока*

Машины постоянного тока, несмотря на преобладающее распространение энергии переменного тока, широко применяются в качестве генераторов и электродвигателей. Двигатели постоянного тока имеют следующие преимущества перед асинхронными:

- позволяют плавно и в широком диапазоне регулировать скорость вращения ротора;
- создают большой тяговый момент.

В системах автоматического управления специальные генераторы постоянного тока служат усилителями электрических сигналов управления и тахогенераторами (датчиками скорости). Генераторы постоянного тока часто используются для питания электролитических ванн в гальванических цепях, зарядки аккумуляторов, высококачественной сварки. Машины постоянного тока выпускаются на мощности от долей Вт до 6000 кВт. Электродвигатели трамваев и троллейбусов имеют мощность 40-50 кВт и работают при напряжении 550 В, а электродвигатели электровозов – 450-500 кВт при напряжении 3 кВ.

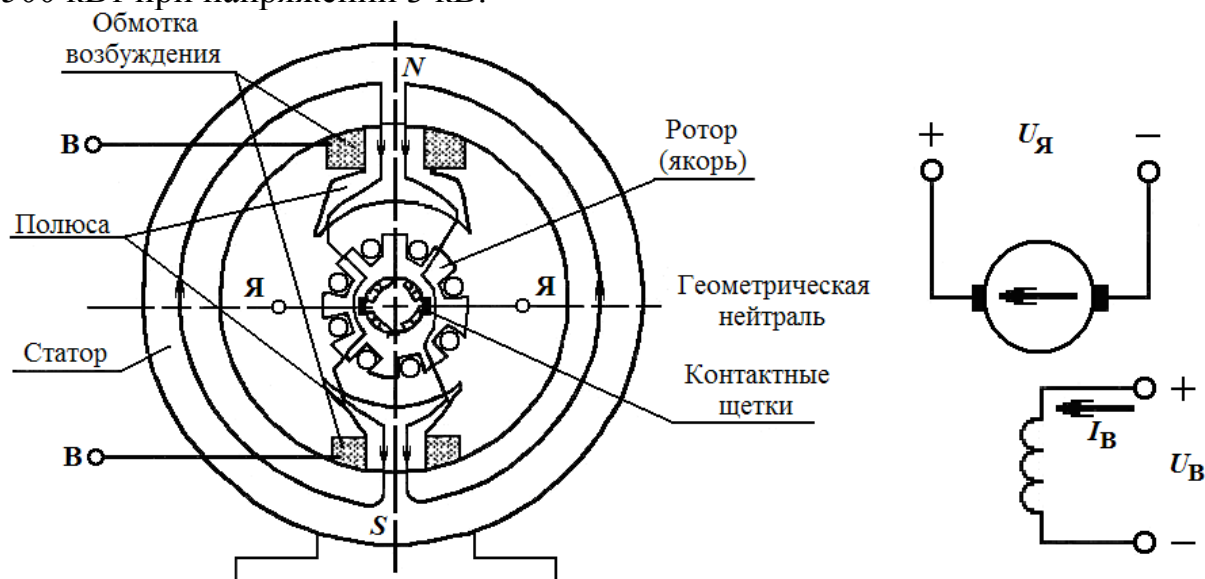


Рис. 2.3.1. Конструкция машины постоянного тока и схемы питания обмоток

Машины постоянного тока состоят из статора и ротора (рис. 2.3.1). Их работа основана на явлении наведения Э.Д.С. в проводниках, движущихся в магнитном поле и появлении электромагнитных сил, действующих на проводники с током в магнитном поле. Магнитное поле создается (говорят «возбуждается») в статоре, для чего в нем устанавливаются либо постоянные магниты, либо электромагниты. Катушки последних соединяются так, чтобы полюса  $N$  и  $S$  чередовались, и создавали обмотку возбуждения. Основная часть потока возбуждения замыкается через сердечники полюсов и ротор, который из-за наличия на нем обмотки называли **якорем**.

Плоскость между смежными полюсами называется **геометрической нейтралью**, а часть окружности якоря между нейтралями называется **полюсным делением  $\tau$** . Обмотка якоря составлена горизонтальными проводниками, которые соединяют последовательно и выводятся на пластины коллектора. По коллектору скользят угольные щетки, через которые в якорь может поступать внешнее напряжение или осуществляется вывод электрической энергии.

### Генераторный и двигательный режимы

Для работы машины в режиме *генератора* требуется в статоре возбудить магнитное поле ( $\Phi_B$  на рис. 2.3.2), привести во вращение с постоянной скоростью  $\omega_0$  якорь и подключить внешнюю электрическую цепь (потребитель) к щеткам.

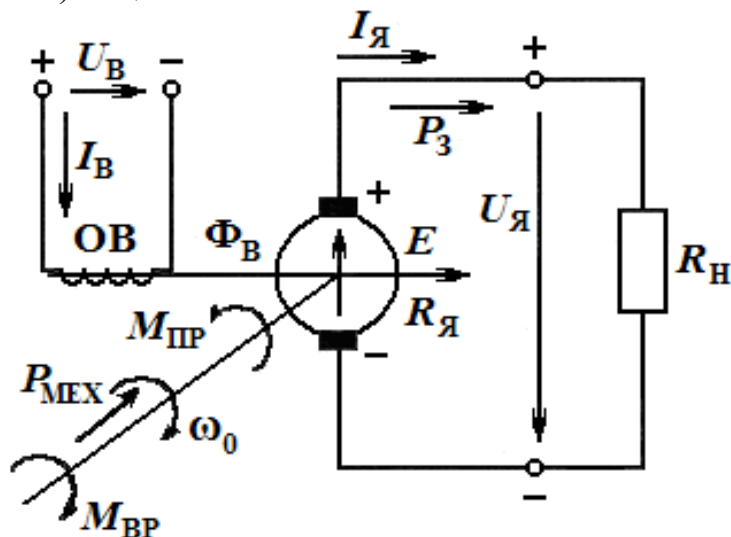


Рис. 2.3.2. Работа машины в режиме генератора

Тогда проводники обмотки якоря будут пересекать магнитные силовые линии поля статора и в них будет наводиться э.д.с.  $e = B_0 \cdot l \cdot v$ , где  $B_0$  – магнитная индукция в зазоре,  $l$  – длина проводника,  $v$  – линейная скорость. Несмотря на переменный характер  $e$ , благодаря наличию коллектора, на щетках установится постоянное напряжение. Подключение к ним внешней

цепи вызовет появление в обмотке якоря тока  $I_{\text{я}}$ . Напряжение на зажимах генератора равно:

$$U = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}.$$

Умножив обе части уравнения на  $I_{\text{я}}$ , получим уравнение баланса мощности цепи якоря:

$$U \cdot I_{\text{я}} = E \cdot I_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2,$$

где  $U \cdot I_{\text{я}}$  – электрическая мощность, отдаваемая в приемник ( $P_{\text{э}}$ );

$E \cdot I_{\text{я}}$  – электромагнитная мощность генератора ( $P_{\text{эм}}$ );

$R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2$  – мощность электрических потерь якорной цепи ( $\Delta P_{\text{э}}$ ).

Таким образом, механическая энергия приводного механизма преобразуется в электрическую, причем э.д.с. генератора равна:

$$E = c_E \cdot \omega \cdot \Phi_B,$$

где  $c_E = \frac{pN}{60a}$  – постоянная генератора, у которого  $p$  – число пар полюсов;

$N$  – число активных проводников обмотки якоря;

$a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Энергетическая диаграмма баланса мощностей генератора приведена на рис. 2.3.3.

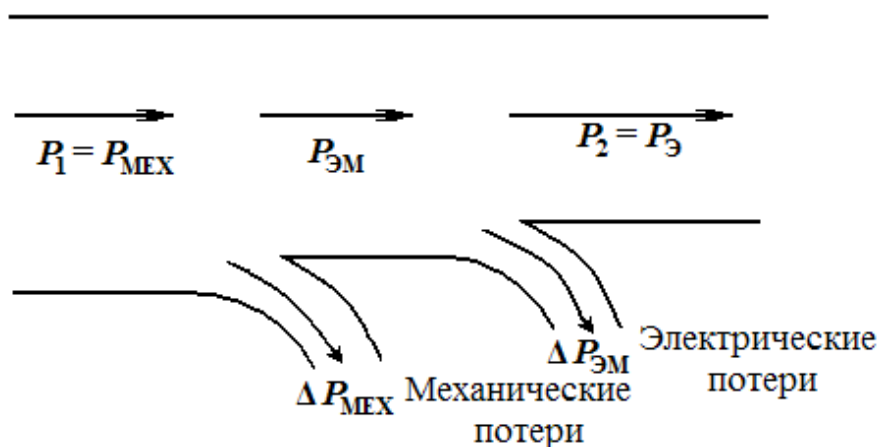


Рис. 2.3.3. Энергетическая диаграмма баланса мощностей генератора

Для генераторного режима характерно влияние магнитного поля якоря от протекающего по его обмотке тока  $I_{\text{я}}$  на магнитное поле статора, которое происходит в зазоре между статором и якорем. Это явление называется реакцией якоря. Ее действие выражается в размагничивании одной стороны полюса и в усилении намагничивания другой его стороны. Но поскольку эти приращения не равны друг другу, то возникает уменьшение общего магнитного потока машины. Для уменьшения реакции якоря в схему статора машины вводятся компенсационные обмотки, расположенные на

дополнительных полюсах, устанавливаемых внутри статора между основными полюсами.

Для работы машины постоянного тока в режиме двигателя требуется кроме создания (возбуждения с помощью расположенной в статоре обмотки) магнитного поля, обеспечить протекание тока в обмотке якоря. Это

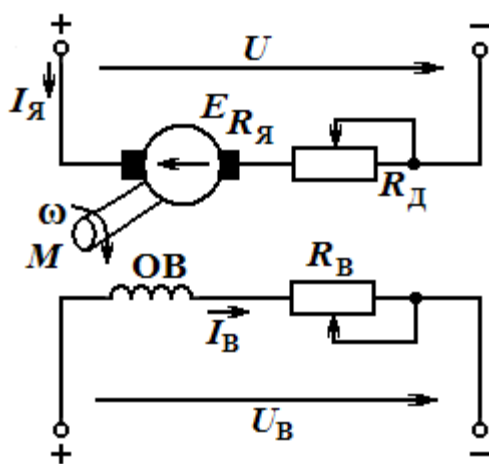


Рис. 2.3.4. Схемы питания обмоток двигателя постоянного тока

осуществляется с помощью внешнего источника, щеточного механизма и коллектора. Поскольку на каждый проводник с током, находящемся в магнитном поле, всегда действует электромагнитная сила:  $F = B \cdot l \cdot I_я$ , то якорь под действием этой силы начинает вращаться. От вращения якоря в его обмотке наводится э.д.с., направленная навстречу току  $I_я$ , которая называется противо-э.д.с.  $E$  (рис. 2.3.4).

Отсюда вытекает, что уравнение состояния для двигателя имеет вид:

$$U = E + I_я \cdot (R_я + R_д),$$

где  $(R_я + R_д)$  – полное сопротивление цепи якоря;

$R_д$  – добавочный переменный резистор.

Поскольку индукция в воздушном зазоре машины равна:

$$B = 2p\Phi / (\pi D l),$$

где  $D$  – диаметр якоря,

$l$  – длина проводника, то получена следующая формула для момента вращения:

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_я.$$

Параметр  $c_M = pN / (2\pi \cdot a)$  – является конструктивным коэффициентом двигателя (постоянной двигателя), причем  $c_M = 60 \cdot c_E / (2\pi)$ .

Добавочное сопротивление обычно используется только при пуске и разгоне двигателя, а затем выводится из цепи. Поэтому уравнение баланса мощностей для двигательного режима машины постоянного тока имеет вид:

$$U \cdot I_я = E \cdot I_я + R_я I_я^2, \Rightarrow P_э = P_{эм} + \Delta P_э,$$

где  $P_э$  – подводимая электрическая мощность,

$P_{эм}$  – электромагнитная (внутренняя) мощность двигателя,

$\Delta P_э$  – электрические потери в цепи якоря.

Это уравнение иллюстрируется энергетической диаграммой на рис. 2.3.5. Таким образом, машина постоянного тока может работать в режиме генератора и двигателя.

Это свойство названо *обратимостью машины*. Свойства двигателей постоянного тока зависят от способов получения магнитного потока (возбуждения  $\Phi_B$ ), которые позволили разработать несколько их разновидностей.

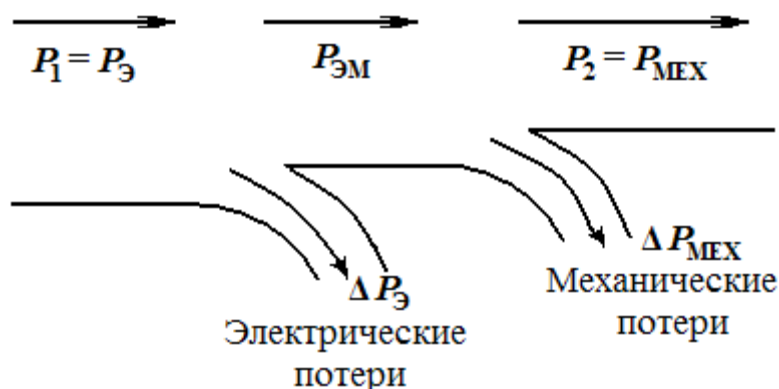


Рис. 2.3.5. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

#### *Способы возбуждения машин постоянного тока и разновидности двигателей постоянного тока*

Обмотка возбуждения и обмотка якоря в машинах постоянного тока могут быть включены в сеть различными способами: независимо друг от друга, параллельно и последовательно. Поэтому различают следующие типы машин постоянного тока:

- машины независимого возбуждения (рис. 2.3.6, а), в которых вышеупомянутые обмотки подключаются к различным источникам;
- машины параллельного возбуждения (рис. 2.3.6, б), в которых обмотка возбуждения имеет большое число витков тонкого провода и так же, как и обмотка якоря, подключается через щеточный механизм и коллектор к общему источнику, т.е. параллельно обмотке якоря (названы шунтовыми двигателями);
- машины последовательного возбуждения (рис. 2.3.6, в), в которых обмотка возбуждения подключается последовательно с обмоткой якоря и имеет малое число витков толстого провода (получили название – сервесные электродвигатели);
- машины смешанного (компаундного) возбуждения (рис. 2.3.6, г), в которых на каждом полюсном сердечнике имеется 2 катушки параллельная (шунтовая) и последовательная (сервесная).

Машины с *независимым возбуждением* получили широкое применение в качестве генераторов и в качестве двигателей, т.к. они способны вырабатывать неизменное напряжение и поддерживать постоянную скорость, соответственно. Параллельное возбуждение также нашло применение в *генераторах с самовозбуждением*, благодаря которому устранен основной

недостаток предыдущего типа машин постоянного тока – потребность в отдельном источнике для возбуждения магнитного потока.

Однако генераторы с самовозбуждением не нашли широкого распространения из-за непостоянства выходного напряжения.

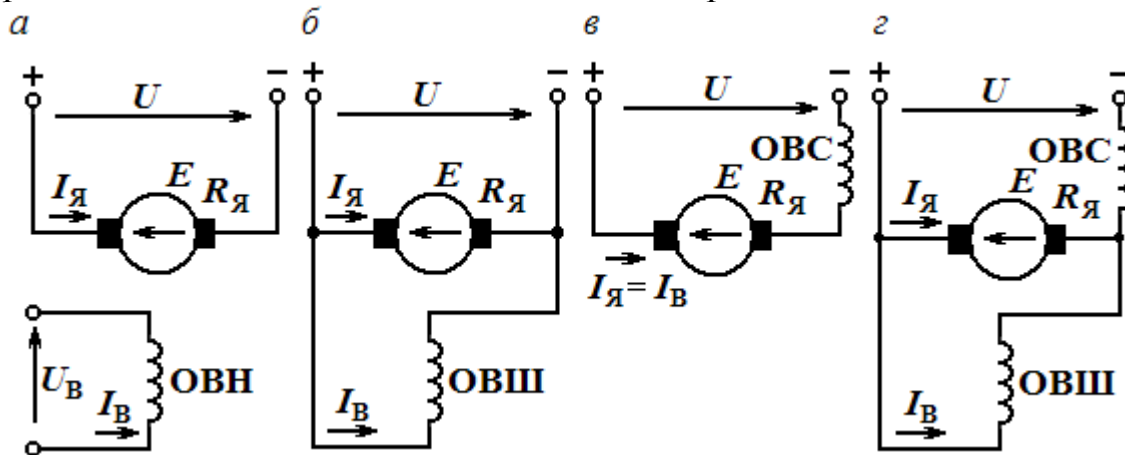


Рис. 2.3.6. Включение обмоток машин постоянного тока: независимого возбуждения (а), параллельного возбуждения (б), последовательного возбуждения (в), смешанного возбуждения (г)

Последовательное возбуждение широко применяется в двигателях, которые имеют хорошие тяговые свойства используются там, где не требуется поддерживать постоянную скорость вращения, т.е. на транспорте.

#### *Пуск двигателей постоянного тока*

Различают 3 способа пуска двигателей постоянного тока:

- 1) прямое включение, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети;
- 2) с помощью пускового реостата, который ограничивает ток якоря при пуске;
- 3) понижением напряжения, подводимого к якорю.

*Первый способ* применяется в двигателях небольшой мощности (до 1 кВт), т.к. создает большой толчок момента. Поэтому наибольшее распространение получил реостатный пуск. Сопротивление реостата выбирают с таким расчетом, чтобы пусковой ток не превышал  $(2 \dots 2,5) I_{ном}$ . Поскольку по мере разгона якоря увеличивается его противо-э.д.с., то начинает уменьшаться его ток и момент. Поэтому для поддержания силовых качеств двигателя пусковой реостат выводят, что вызывает рост тока и вращающего момента, а также возрастание скорости. Пуск происходит быстро и легко, если двигатель развивает пусковой момент, превышающий момент сопротивления на валу. Последний способ пуска используется в специальных системах, называемых системами генератор-двигатель (Г-Д). Хотя система Г-Д дорогá, т.к. состоит из нескольких машин, она нашла применение для привода мощных двигателей, например прокатных станков, а также в системах автоматического регулирования.

### Механические характеристики и регулирование скорости электродвигателей постоянного тока

Зависимость установившейся угловой скорости  $\omega$  от момента  $M$  на валу двигателя при постоянном напряжении и сопротивлении цепи якоря называется механической характеристикой двигателя. Так как  $\omega = E/c\Phi$ , а  $E = U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ , то угловая скорость равна:  $\omega = \frac{U - R_{\text{я}}I_{\text{я}}}{c\Phi}$ . Ток  $I_{\text{я}}$  якоря можно выразить через момент нагрузки и магнитный поток полюса, т.е.  $I_{\text{я}} = \frac{M}{c\Phi}$ .

Тогда уравнение механической характеристики  $\omega = \frac{Uc\Phi - R_{\text{я}}M}{c^2\Phi^2}$ .

Характеристика, полученная при  $R_{\text{д}}=0$ ,  $\Phi=\Phi_{\text{ном}}$  и  $U=U_{\text{ном}}$ , называется естественной механической характеристикой. Она считается жесткой. Изменяя сопротивление  $R_{\text{д}}$  реостата, можно получить семейство искусственных механических характеристик, более мягких (или плавных), чем естественная. Однако реостатное регулирование позволяет только уменьшать скорость вращения, а из-за значительных потерь энергии в реостате он используется только в двигателях малой мощности.

Полюсное регулирование (рис. 2.3.7, б) скорости вращения требует изменения тока возбуждения, для чего в цепь обмотки возбуждения вводится реостат  $R_{\text{в}}$ . В этом случае скорость холостого хода  $\omega_0$  изменяется обратно пропорционально квадрату магнитного потока (или тока возбуждения), причем каждому значению  $\Phi$  соответствует свое значение не только  $\omega_0$ , но и пускового момента  $M_{\text{п}}$ .

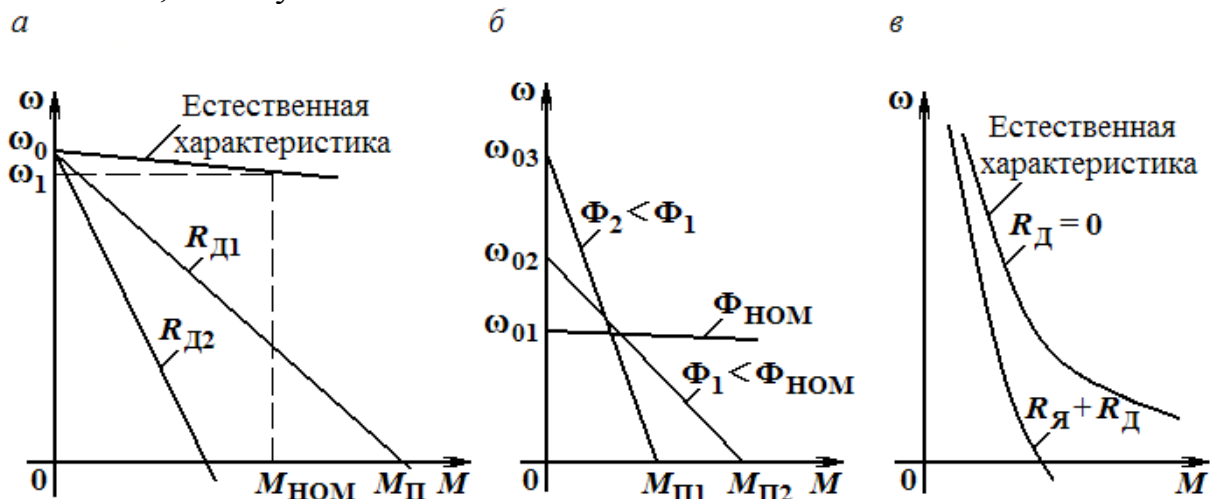


Рис. 2.3.7. Механические характеристики двигателей постоянного тока: параллельного возбуждения (а), последовательного возбуждения (б, в)



В двигателе последовательного возбуждения (рис. 2.3.6, б) ток якоря и ток возбуждения одинаковы и его вращающий момент пропорционален квадрату этого тока. Поэтому механические характеристики такого двигателя имеют гиперболический вид, обуславливающий уменьшение скорости вращения при увеличении момента нагрузки и наоборот (см. рис. 2.3.7, в). Отсюда следует, что при уменьшении нагрузки его скорость может резко возрасти и двигатель может пойти в «разнос». Чтобы не допустить этого, сервесные двигатели постоянного тока используют в механизмах, не допускающих режима холостого хода.

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Шестиполусный двигатель постоянного тока смешанного возбуждения работает от сети с напряжением  $U = 220$  В и вращается с частотой  $n = 1000$  об/мин. Двигатель рассчитан на номинальный ток  $I_{\text{ном}} = 13,3$  А; к.п.д.  $\eta = 75,2\%$ , сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 1,65$  Ом, сопротивление параллельной обмотки возбуждения  $R_{\text{в}} = 183$  Ом, имеется 3 пары параллельных ветвей и 240 проводников обмотки якоря. Определить магнитный поток, вращающий момент на валу двигателя, электромагнитную, потребляемую и номинальную мощности.

*Решение*

Для определения  $\Phi$  предварительно найдем ток якоря и э.д.с. обмотки якоря. Ток в параллельной обмотке возбуждения:

$$I_{\text{в}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{в}}} = \frac{220}{183} = 1,2 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря:  $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 13,3 - 1,2 = 12,1$  А.

Э.д.с., наводимая в обмотке якоря:

$$E_{\text{я}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 220 - 12,1 \cdot 1,65 = 200 \text{ В.}$$

Магнитный поток определим из формулы

$$E = \frac{p \cdot N \cdot n_{\text{ном}} \cdot \Phi}{60 \cdot a},$$

Откуда

$$\Phi = \frac{60 \cdot A \cdot E}{p \cdot N \cdot n_{\text{ном}}} = \frac{60 \cdot 3 \cdot 200}{3 \cdot 240 \cdot 1000} = 0,05 \text{ Вб.}$$

Электромагнитная мощность:  $P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} = 2420$  Вт.

Потребляемая мощность:  $P_1 = U_1 I_{\text{ном}} = 220 \cdot 13,3 = 2926$  Вт.

Номинальная мощность:  $P_{\text{ном}} = P_1 \eta = 2926 \cdot 0,752 = 2200$  Вт.

Вращающий момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M = \frac{9,55 \cdot P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{9,55 \cdot 2200}{1000} = 21 \text{ Н·м.}$$



2. Генератор постоянного тока П51 с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: мощность  $P_{\text{ном}} = 5$  кВт, напряжение  $U = 230$  В, частота вращения  $n_{\text{ном}} = 1450$  об/мин, сопротивление обмотки возбуждения  $R_B = 91$  Ом, сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,635$  Ом, магнитные и механические потери  $P_{\text{х}} = 0,052$  от  $P_{\text{ном}}$ . Определить номинальный ток обмотки якоря, э.д.с. обмотки якоря при номинальном режиме, потери электрические, сумму потерь, потребляемую (механическую) мощность, к.п.д. при номинальном режиме работы.

*Решение*

Сначала найдем номинальный ток генератора и ток обмотки возбуждения:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{5000}{230} = 21,74 \text{ А.}$$

$$I_B = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}}} = \frac{230}{91} = 2,52 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря равен:  $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} + I_B = 21,74 + 2,52 = 24,26 \text{ А.}$

Э.д.с., наводимая в обмотке якоря при номинальном режиме:

$$E_{\text{я}} = U_{\text{ном}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 230 + 24,26 \cdot 0,635 = 245,4 \text{ В.}$$

Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = 24,26^2 \cdot 0,635 = 373,7 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке возбуждения:

$$P_B = I_B^2 R_B = 2,52^2 \cdot 91 = 577,8 \text{ Вт.}$$

Магнитные и механические потери:  $P_{\text{х}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мх}} = 0,052 \cdot P_{\text{ном}} = 260 \text{ Вт.}$

Сумма потерь при номинальном режиме:

$$\sum P = P_{\text{я}} + P_B + P_{\text{х}} = 373,7 + 577,8 + 260 = 1211,5 \text{ Вт.}$$

Потребляемая мощность:  $P_1 = P_{\text{ном}} + \sum P = 5000 + 1211,5 = 6211,5 \text{ Вт.}$

К.п.д. при номинальном режиме:

$$\eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_1} = \frac{5000}{6211,5} = 0,805.$$

## 2.4. Асинхронные электрические машины

### *Общее устройство и принцип действия асинхронной электрической машины*

Электрические машины переменного тока представлены синхронными и асинхронными машинами, которые могут работать и как двигатель, и как генератор. Асинхронные машины (в подавляющем большинстве это электродвигатели) являются самой распространенной разновидностью электрических машин переменного тока. Второй популярной разновидностью машин переменного тока являются синхронные генераторы (работают на электростанциях), но есть и мощные синхронные двигатели специфического назначения.

Трехфазные асинхронные электродвигатели разработаны русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским в 90-х годах XIX века. Сам принцип асинхронного преобразования электрической энергии в механическую (энергию вращения) был изобретен сербским инженером Н. Теслой немного раньше.

Принцип действия асинхронных двигателей основан на 2-х явлениях: образовании вращающегося магнитного поля токами трехфазной обмотки статора и взаимодействии этого поля с индуцированными токами в обмотке ротора. Статор машины собирают из листов электротехнической стали с предварительно вырубленными в них пазами для укладки проводников обмотки. Пакет листов статора запрессовывается в корпус. Ротор также собирают из штампованных листов электротехнической стали, которые запрессовывают на вал, устанавливаемый на шарикоподшипники. Возможны 2 варианта изготовления ротора:

- с трехфазной обмоткой, соединенной звездой, выводы которой подключаются к контактным кольцам (двигатели с фазным ротором или коллекторные асинхронные машины);
- с короткозамкнутой обмоткой типа «беличье колесо» (с короткозамкнутым ротором).

Контактные кольца ротора двигателя первого типа подключают с помощью щеток к трехфазному реостату для улучшения пуска и регулирования скорости вращения. Короткозамкнутую обмотку изготавливают (рис. 2.4.1), заливая в пазы ротора расплавленный алюминий. Ее стержни замкнуты между собой торцовыми пластинами в виде колец, которые отливают вместе со стержнями.

Условные графические обозначения асинхронных двигателей с фазным и с короткозамкнутым роторами приведены на рис. 2.4.2, соответственно.

Магнитная система асинхронной машины (рис. 2.4.3) состоит из двух сердечников: наружного 1, имеющего форму полого цилиндра и называемого *статором*, и внутреннего цилиндрического вращающегося сердечника 2, называемого *ротором*. Оба они собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для уменьшения потерь на вихревые токи, листы изолированы друг от друга.

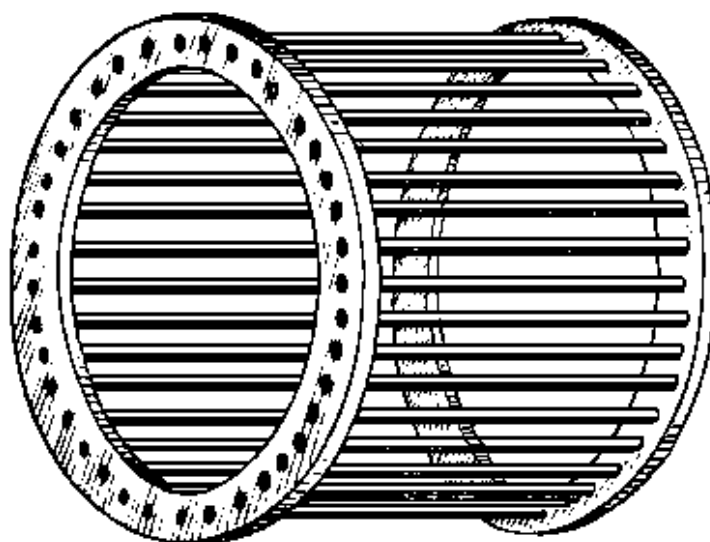


Рис. 2.4.1. Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронной машины

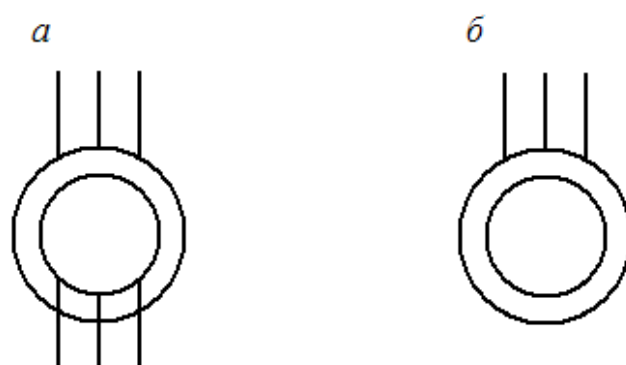


Рис. 2.4.2. Условные графические обозначения асинхронных двигателей: с фазным ротором (а), с короткозамкнутым ротором (б)

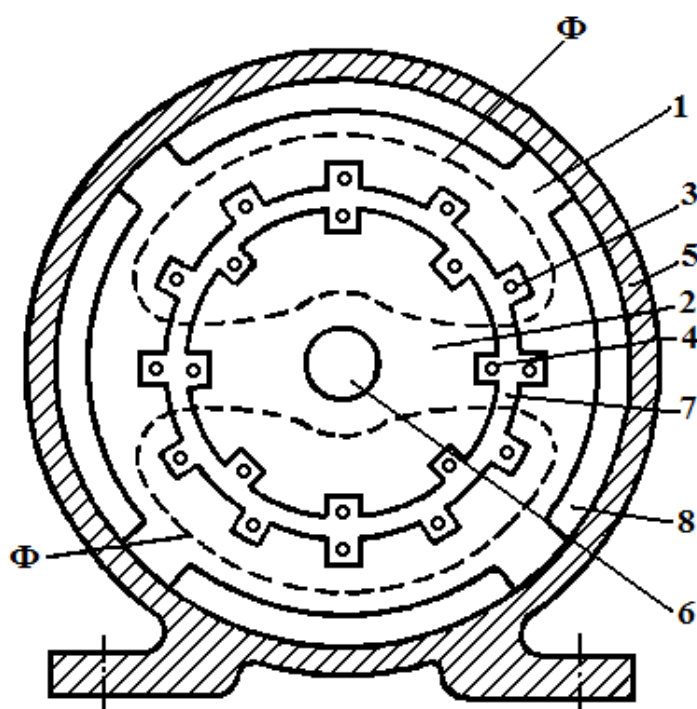


Рис. 2.4.3. Магнитная система асинхронной машины

В пазах с внутренней стороны статора уложена трехфазная обмотка 3, токи которой возбуждают вращающееся магнитное поле. Обмотка каждой фазы статора состоит из нескольких последовательно включенных катушек, что способствует синусоидальному закону распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором. В пазах ротора размещена вторая обмотка 4, токи в которой индуктируются вращающимся магнитным полем статора. Сердечник статора 1 заключен в массивный корпус 5, являющийся внешней частью асинхронной машины, а сердечник ротора 2 укреплен на валу 6.

Обмотка статора 3 укладывается в его пазы обычно в виде секций, заранее заготовленных на специальных шаблонах. Каждая обмотка одной фазы должна занимать равное число пазов, т.е. должна быть расположена симметрично над всеми полюсами статора.

Рассмотрим процесс образования в неподвижной трехфазной обмотке статора *вращающегося магнитного поля*. Допустим, что мы имеем статор (рис. 2.4.5), в котором расположены три рамки, сдвинутые по отношению друг к другу на угол  $120^\circ$ , причем по ним проходит переменный ток, график, изменения которого имеет следующий вид (рис. 2.4.4). Условимся, что если ток в данной фазе в данный момент времени имеет положительное значение, т.е. выше линии времени, то будем считать, что ток идет в соответствующую рамку от ее начала к концу. При отрицательном значении тока будем считать, что ток идет от конца к началу.

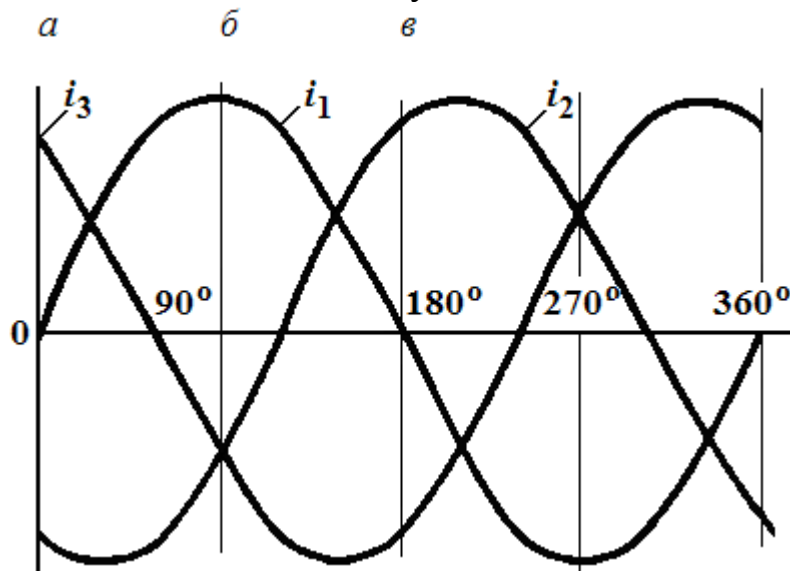


Рис. 2.4.4. Временные графики токов в фазах машины

В начальный момент времени «а» ток первой фазы равен нулю, ток 2-й фазы имеет отрицательное значение, а ток 3-ей фазы – положительное. Для момента времени «а» токи во всех 3-х рамках статора имеют следующие направления (рис. 2.4.5, а). Причем направление магнитного поля,

создаваемого каждой рамкой, определяется по правилу буравчика. Направление результирующего магнитного потока  $\Phi$  от трех рамок будет совпадать с направлением магнитного потока 2-й и 3-й фаз. Поступая таким же образом для момента времени «б» и «в», можно показать, что вектор результирующего потока  $\Phi$ , не изменяясь по величине, вращается в пространстве в одну и ту же сторону, в данном случае по часовой стрелке. Направление вращения результирующего магнитного потока  $\Phi$  зависит от порядка чередования фаз ( $A-B-C$  или  $A-C-B$ ) и при изменении этой последовательности изменится и направление его вращения. Для этого достаточно поменять местами два линейных провода из трех, подходящих к статору от сети.

Таким образом, при подключении к статору асинхронного двигателя трехфазного переменного тока, внутри его возникает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется формулой

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (2.4.1)$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля статора (об/мин);

$f_1$  – частота тока питающей статор сети (Гц);

$p$  – число пар полюсов двигателя.

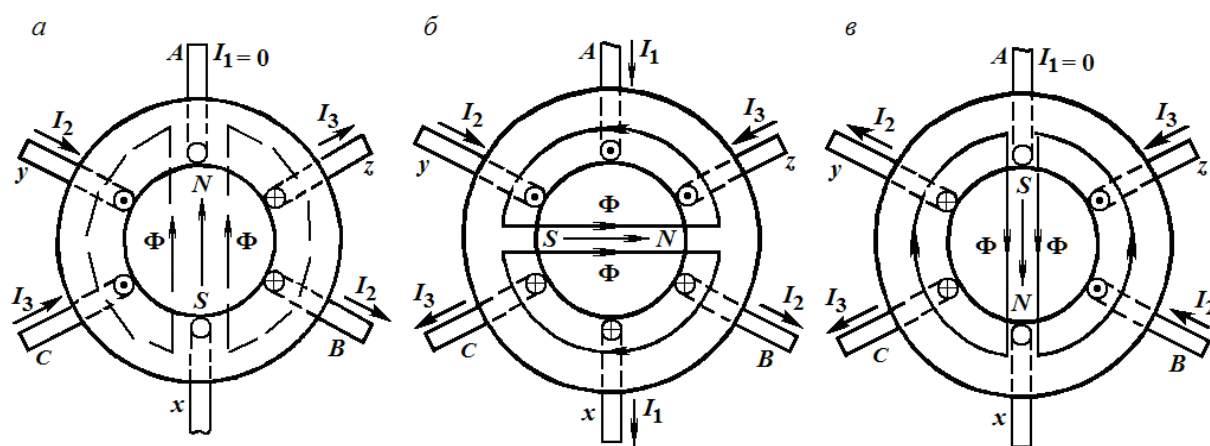


Рис. 2.4.5. Образование вращающегося магнитного поля в асинхронном двигателе

Когда магнитное поле статора начнет пересекать проводники ротора, в них возникнут э.д.с.  $E_2$  и ток  $I_2$ , который вследствие индуктивности ротора будет отставать от  $E_2$  на угол  $\varphi_2$  (рис.2.4.6). Ток  $I_2$  ротора будет взаимодействовать с вращающимся магнитным полем статора и на каждый проводник ротора начнет действовать электромагнитная сила, направление которой, как отмечалось ранее, совпадает с направлением вращающегося магнитного поля статора.

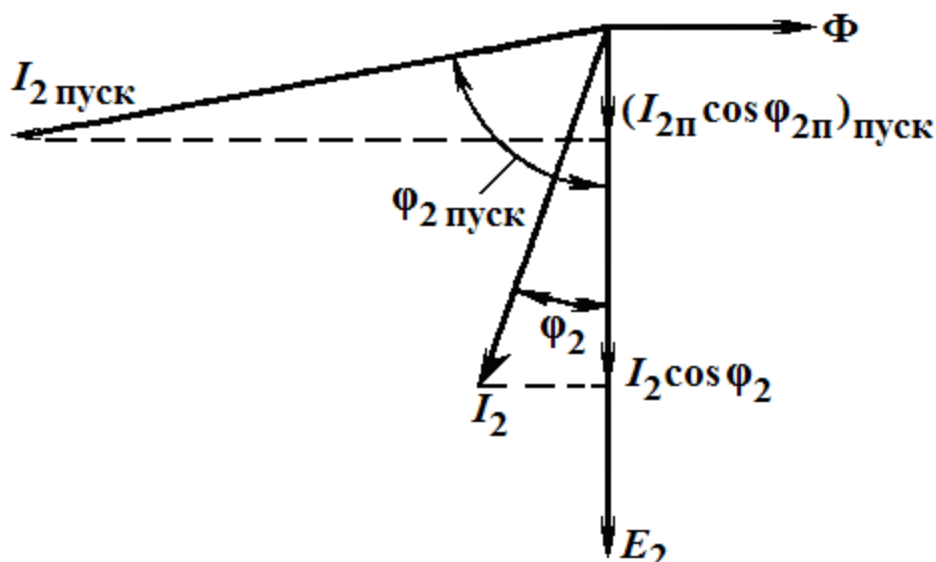


Рис. 2.4.6. Векторная диаграмма асинхронной машины

Причем, частота вращения  $n_2$  ротора никогда не сможет достигнуть частоты вращения магнитного поля статора  $n_1$ . Действительно, при  $n_2 = n_1$  проводники ротора не пересекались бы магнитными линиями вращающегося поля статора и в них не возникали бы э.д.с. и токи, взаимодействие которых с вращающимся полем статора и вызывает вращение ротора.

Таким образом, характерной особенностью асинхронной машины является наличие неравенства частот вращения  $n_1$  и  $n_2$ . Только при этом условии в проводниках обмотки ротора индуцируется Э.Д.С. и возникает электромагнитный момент, приводящий во вращение ротор. Поэтому рассматриваемые машины и называются *асинхронными*, т.е. несинхронными, поскольку их ротор вращается несинхронно с магнитным полем статора.

Отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля статора называется *скольжением* и определяется по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% . \quad (2.4.2)$$

При изменении нагрузки на валу или тормозного момента, будет изменяться и вращающий момент. Так, например, при увеличении нагрузки на валу, тормозной момент вызовет некоторое уменьшение частоты вращения ротора, а это, в свою очередь – возрастание относительной скорости движения проводников ротора в магнитном поле статора. Последнее приведет к увеличению наводимой в роторе э.д.с. и тока. В результате вращающийся момент увеличится до величины, равной тормозному моменту. При уменьшении нагрузки на валу, частота вращения ротора, наоборот, увеличится, а э.д.с. и ток ротора уменьшатся, вследствие чего уменьшится и вращающий момент, до величины, равной новому тормозному моменту.

Таким образом, скольжение у работающих асинхронных двигателей увеличивается с ростом нагрузки на валу и уменьшается с ее снижением, хотя скольжение и меняется в небольших пределах.

При *пуске* двигателя его ротор находится в состоянии покоя и  $n_2$  равна нулю, а поэтому скольжение в этом случае равно:

$$s = \frac{(n_1 - 0)}{n_1} = 1 \text{ или } 100 \, \%.$$

При *холостом ходе* двигателя, когда тормозной момент на его валу почти равен нулю, можно считать, что частота вращения ротора  $n_2$  почти равна частоте вращения  $n_1$  магнитного поля статора, а поэтому скольжение:

$$s = \frac{(n_1 - n_1)}{n_1} = 0.$$

Следовательно, при нарастании скорости ротора от нуля до синхронной, скольжение изменяется от единицы до нуля.

Так как частота вращения поля статора выражается формулой (2.4.1), то скорость вращения ротора асинхронного двигателя зависит от числа пар его полюсов. Как правило, асинхронные двигатели имеют 1 – 4 пары полюсов, а поэтому скорость вращения магнитного поля статора в них составляет 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. Соответственно, частота вращения ротора бывает порядка 2880, 1440, 950 и 720 об/мин (удовлетворяет соотношению:  $n_2 = n_1(1 - s)$ ). Зная эту частоту, можно точно определить передаточное число исполнительного механизма, т.е. размеры шкивов, зубчатых колес и т.д.

#### *Механические и рабочие характеристики асинхронных двигателей*

Поскольку условия индуцирования э.д.с. в обмотках трансформатора и асинхронного двигателя одинаковы, то к ним тоже применимы формулы для определения трансформаторной Э.Д.С.. Пока ротор двигателя неподвижен, его обмотка пересекается вращающимся магнитным полем с частотой  $n_1$ . Тогда формула для действующего значения э.д.с. одной фазы неподвижного ротора примет вид:

$$E_{2H} = 4,44w_2k_2f_1\Phi, \quad (2.4.3)$$

где  $w_2$  – число витков одной фазы обмотки ротора;

$k_2$  – обмоточный коэффициент ротора (находится в пределах 0,92–0,95 и учитывает неодновременность пересечения витков обмотки ротора магнитным потоком);

$f_1$  – частота тока питающей сети;

$\Phi$  – вращающийся магнитный поток.

При неподвижном роторе частота индуцируемой в его обмотке э.д.с. равна частоте сети  $f_1$ . По мере раскручивания ротора скорость ( $n_1 - n_2$ )

пересечения витков обмотки вращающимся магнитным полем уменьшается, а следовательно, уменьшается частота э.д.с. в обмотке ротора:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}. \quad (2.4.4)$$

Чтобы ввести скольжение в выражение для  $f_2$ , умножим числитель и знаменатель на  $n_1$ :

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2) \cdot n_1}{60n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot \frac{pn_1}{60} = s \cdot f_1. \quad (2.4.5)$$

Таким образом, частота э.д.с. в обмотке ротора пропорциональна скольжению. Теперь можно записать выражение для э.д.с. обмотки ротора в общем случае:

$$E_2 = 4,44w_2k_2f_2\Phi = 4,44w_2k_2sf_1\Phi = sE_{2H}. \quad (2.4.6)$$

Поскольку в асинхронном двигателе обмотка ротора замкнута накоротко, то э.д.с. расходуется в собственном активном и реактивном сопротивлениях обмотки. В двигателе с фазным ротором активное сопротивление может изменяться за счет включения регулировочного реостата. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора определяется по известной формуле

$$X_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 \cdot L_2 = s \cdot \omega_1 \cdot L_2 = s \cdot X_{2H}.$$

На основании закона Ома имеем:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2H}^2}}. \quad (2.4.7)$$

Отсюда видно, что ток в обмотке неподвижного ротора ( $s = 1$ ) имеет наибольшее значение, но по мере раскручивания ротора и уменьшения скольжения  $s$  ток  $I_2$  также уменьшается и при  $s = 0$  ток  $I_2 = 0$ .

Сдвиг фаз между  $E_2$  и  $I_2$  может быть определен по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{sX_{2H}}{R_2}.$$

Так как  $X_{2H} = \omega_1 L_2$  и  $R_2$  не зависят от частоты вращения двигателя  $n_2$ , то  $\operatorname{tg} \varphi_2$  пропорционален скольжению  $s$ . Угол  $\varphi_2$  можно определить также по формуле

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2H})^2}}. \quad (2.4.8)$$



Теперь следует определить вращающий момент  $M$  асинхронного двигателя и изучить его зависимость от скольжения. Воспользуемся известной формулой:

$$M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2 = c\Phi \frac{sE_H}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2H})^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2H})^2}} = c\Phi \frac{E_{2H}R_2}{\frac{R_2^2}{s} + sX_{2H}^2}. \quad (2.4.9)$$

Как и следовало ожидать, при  $s = 0$  вращающий момент исчезает. При  $s = \infty$  он также обращается в нуль. Таким образом, с увеличением скольжения от нуля  $M$  увеличивается, а с дальнейшим возрастанием  $s$  до бесконечности снова стремится к нулю. Зависимость  $M$  от  $s$  приведена на рис. 2.4.7, *a*. На нем выделены 3 момента: номинальный вращающий момент  $M_H$ , максимальный момент  $M_{\max}$  и пусковой момент  $M_{\Pi}$ .

Номинальный момент соответствует скольжению  $s = 0,03 \dots 0,05$ ; максимальный момент –  $s = 0,1 \dots 0,14$  (это скольжение называется оптимальным –  $s_{\text{опт}}$ ), а пусковой момент –  $s = 1$ . Обычно у асинхронного двигателя  $M_{\max}$  в 2...3 раза превышает  $M_H$ , а  $M_{\Pi}$  примерно равен  $M_H$ , что является основным недостатком асинхронного двигателя.

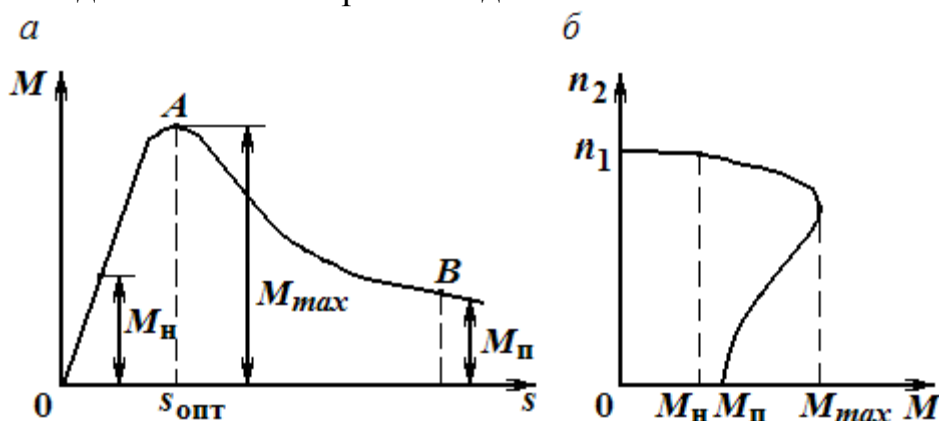


Рис. 2.4.7. Зависимости  $M$  от  $s$  (*a*),  $n$  от  $M$  (*б*) в асинхронном двигателе

Кривая  $M(s)$  разделена на 2 участка:  $OA$  и  $AB$ . Участок  $OA$  соответствует устойчивым режимам работы асинхронного двигателя: с увеличением нагрузки частота вращения ротора замедляется, увеличивается скольжение и, как видно из графика, возрастает вращающий момент. При этом двигатель устойчиво вращается с уменьшенной частотой.

Участок  $AB$  соответствует неустойчивым режимам работы асинхронного двигателя: с увеличением нагрузки скольжение увеличивается, вращающий момент уменьшается, скольжение возрастает еще больше и т.д. Двигатель останавливается и начинает быстро нагреваться, т.к. при  $s=1$  его пусковой ток в 5-7 раз превышает номинальное значение.

На рис. 2.4.7, *б* приведен график зависимости частоты  $n_2$  (либо  $\omega_2$ ) вращения вала асинхронного двигателя от вращающего момента  $M$ ,

которую называют *механической характеристикой*. Она может быть снята экспериментально или получена из графика  $M(s)$  на рис. 2.4.7, а. С увеличением нагрузки частота вращения уменьшается незначительно. Но если момент нагрузки превысит максимальный, то частота вращения двигателя лавинообразно уменьшается до нуля. Считается, что вращающий момент пропорционален квадрату напряжения, поэтому даже небольшие колебания напряжения питания приводят к заметному изменению вращающего момента и частоты вращения двигателя.

**Энергетическая диаграмма работы асинхронного двигателя** (приведена на рис. 2.4.8). К статору асинхронной машины, работающей в двигательном режиме, из сети подводится мощность:

$$P_1 = 3U_{1\Phi} I_{1\Phi} \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi. \quad (2.4.10)$$

Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в активном сопротивлении обмотки статора  $\Delta P_{1\sigma} = 3R_1 I_1^2$ , и магнитных потерь  $\Delta P_{1M}$  в стали статора. В ротор посредством вращающегося магнитного поля передается электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{1\text{эл}} - \Delta P_{1M}. \quad (2.4.11)$$

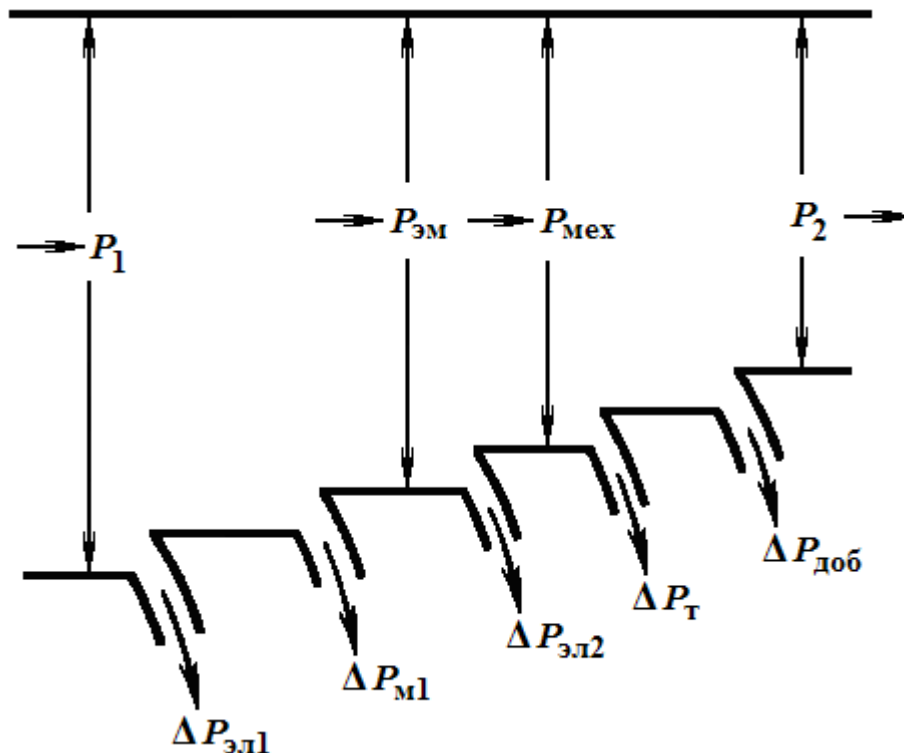


Рис. 2.4.8. Энергетическая диаграмма мощностей асинхронного двигателя

Часть электромагнитной мощности, полученной ротором, тратится на покрытие электрических потерь  $\Delta P_{2эл}$  в его обмотке. Оставшаяся часть мощности  $P_{эм}$  превращается в механическую мощность:  $P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{2эл}$ .

Магнитные потери в стали ротора  $\Delta P_{2м}$ , из-за малой частоты перемагничивания, практически отсутствуют. За вычетом незначительных потерь на трение  $\Delta P_T$  и добавочных потерь  $\Delta P_{доб}$ , механическая мощность двигателя отдается нагрузке и является выходной полезной мощностью:

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_T - \Delta P_{доб} = M \cdot \omega_2 = \frac{M \cdot n_2}{9,55}, \quad (2.4.12)$$

где  $P_2$  в Вт, а  $M$  – в Н·м,  $n_2$  – в об/мин.

**Вращающий момент на валу двигателя:**

$$M = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_2} = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\omega_1}, \quad (2.4.13)$$

где  $E_2$  и  $I_2$  – э.д.с. и ток в роторе;

$\varphi_2$  – угол сдвига фаз между током и э.д.с. ротора.

*Рабочими характеристиками асинхронного двигателя* называют зависимости частоты вращения ротора  $n_2$  или скольжения  $s$ , от момента на валу  $M_2$ , тока статора  $I_1$ , К.П.Д.  $\eta$  и  $\cos \phi_1$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и . Их определяют экспериментальным или расчетным путем по схеме замещения. Они имеют следующий вид (рис. 2.4.9). Частота вращения, ток статора, момент на валу и полезная мощность отложены на графике в относительных единицах. При переходе от режима холостого хода к режиму полной нагрузки, частота вращения ротора обычно изменяется в пределах 2–6%, т.е. скоростная характеристика асинхронного двигателя является «жесткой». Момент  $M_2$  связан с полезной мощностью соотношением

$$P_2 = M_2 \omega_2 = \frac{M_2 2\pi n_2}{60}. \quad (2.4.14)$$

Поскольку  $n_2$  изменяется мало, зависимость  $M_2 = f(P_2)$  близка к прямолинейной. Активная составляющая тока  $I_1$  пропорциональна полезной мощности, в то время как его реактивная составляющая в диапазоне рабочих нагрузок двигателя изменяется незначительно. Зависимость  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  носит такой же характер, как и для трансформатора. Максимальный к.п.д.:  $\eta_{\max} = 0,7 - 0,9$  – для машин средней мощности и  $\eta_{\max} = 0,9 - 0,92$  – для машин большой мощности.

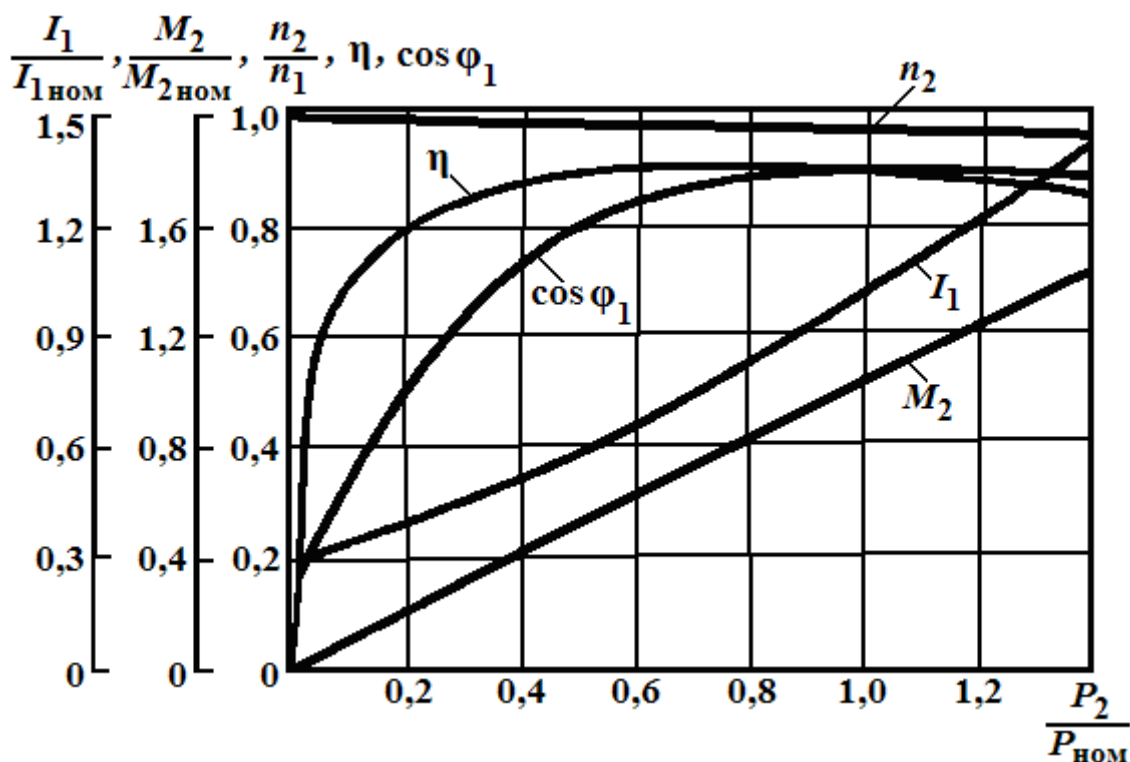


Рис. 2.4.9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

#### *Пуск, регулирование скорости и торможение асинхронных двигателей*

Для пуска асинхронного двигателя требуется сначала немного разгрузить его, т.е. выполнить условие  $M < M_{\Pi}$ , но при этом важно не допускать превышения пускового тока за рамки  $(5 \dots 7)I_{\text{ном}}$ . При пуске асинхронного двигателя с фазным ротором обычно используется трехфазный реостат (рис. 2.4.10), каждая фаза  $r_{\Pi}$  которого через щетки и контактные кольца (не показаны на рис. 2.4.10) включена в одну из фаз ротора.

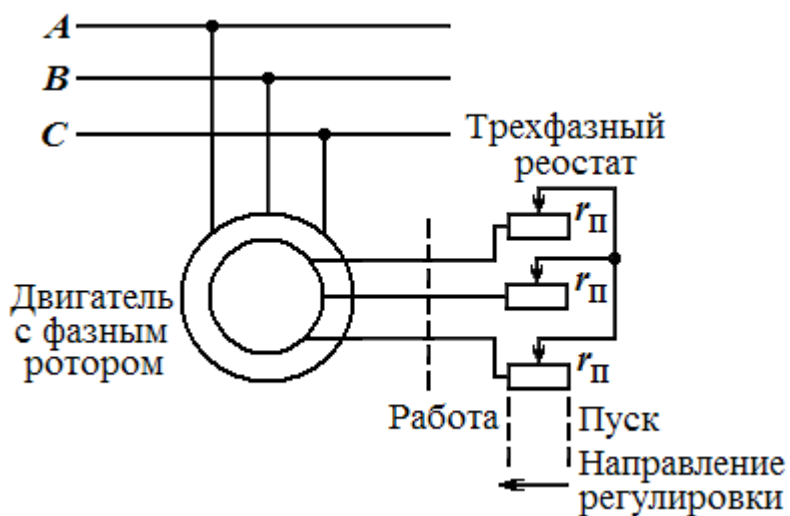


Рис. 2.4.10. Схема пуска асинхронного двигателя

В начале пуска он введен полностью и  $r_n = \max$  (соответствует положению «Пуск»), а к концу – полностью выводится и его движок устанавливается в положение «Работа», в котором все фазы ротора замыкаются накоротко. Реостат не может долго оставаться включенным, т.к. может перегореть. Число ступеней регулирования может достигать 5...10.

Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором производится с учетом его мощности. При небольшой мощности он запускается простым включением в сеть с помощью рубильника или пускового автомата. При большой мощности применяют либо автотрансформаторный пуск, либо делают переключение обмоток (сначала «звезда», а потом «треугольник»), чтобы понизить напряжение при пуске и ограничить пусковой ток.

Для изменения скорости вращения асинхронного двигателя применяют следующие способы:

- полюсное регулирование;
- частотное регулирование;
- роторное регулирование.

*Полюсное регулирование* основано на изменении числа пар полюсов вращающегося магнитного поля и осуществляется конструкцией обмотки статора. При частоте сети 50 Гц можно получить следующий ряд скоростей вращения: 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин. Для получения скорости больше 3000 об/мин повышают частоту колебания напряжения в сети.

*Частотное регулирование* связано с изменением частоты напряжения на статорной обмотке и позволяет осуществлять плавное регулирование скорости вращения ротора в широком диапазоне. Для осуществления этого способа применяют специальные устройства, называемые инверторами, которые относятся к управляемым источникам вторичного электропитания.

*Роторное регулирование* логически вытекает из схемы реостатного пуска, но осуществляется с помощью дополнительного источника, включаемого встречно по отношению к индуцируемой в роторе э.д.с. Оно также позволяет плавно регулировать скорость вращения ротора в сторону уменьшения по сравнению с номинальной.

Поскольку все электрические машины считаются *обратимыми*, т.е. могут служить не только двигателями, но и генераторами. Асинхронные машины редко используются как генераторы, т.к. не обеспечивают постоянства частоты вырабатываемого напряжения. Для этой цели более удобны синхронные машины.

*Торможение* в асинхронном двигателе достигается противовключением обмоток статора, т.е. изменением порядка включения каких-либо его 2-х фаз, непосредственно в процессе работы. Тогда ротор будет продолжать вращаться, но против вращения поля за счет сил инерции, т.е. возникнет режим электромагнитного тормоза. Однако при остановке вала двигателя

следует обмотку статора отключить от сети, предотвращая разгон двигателя в обратном направлении.

Еще есть *рекуперативное торможение*, которое заключается в переводе машины из режима двигателя в режим генератора, что вызывает появление противодействующего момента, не связанного с дополнительными потерями электрической или другой энергии в цепи ротора на замедление вращения вала.

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Найти э.д.с., индуцируемую в фазе обмоток статора и ротора, асинхронного короткозамкнутого двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, коэффициент трансформации и процентное значение э.д.с. от подводимого напряжения обмотки статора, если известны следующие паспортные данные двигателя: скольжение  $s = 4 \%$ , обмотка статора соединена в звезду и подключена к сети переменного тока с линейным напряжением  $U_1 = 380 \text{ В}$ , число витков в каждой фазе статора  $w_1 = 88$ , ротора  $w_2 = 12$ , магнитный поток  $\Phi = 1,21 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$ , обмоточный коэффициент статора  $K_{01} = 0,92$ , ротора  $K_{02} = 0,95$ , частота тока  $f = 50 \text{ Гц}$ .

*Решение*

Определяем э.д.с., индуцируемую в фазе обмотки статора:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m K_{01} = 4,44 \cdot 50 \cdot 88 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot 0,92 = 217,5 \text{ В}.$$

Э.д.с., индуцируемая в фазе обмотки неподвижного ротора, равна:

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi_m K_{02} = 4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 30,6 \text{ В}.$$

Коэффициент трансформации представляет собой отношение э.д.с. обмотки статора к э.д.с. обмотки ротора:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{217,5}{30,6} = 7,1.$$

Э.д.с., индуцируемая в фазе обмотки вращающегося ротора, при скольжении и  $s = 4 \%$ :

$$E_{2s} = E_2 \cdot s = 30,6 \cdot 0,04 = 1,22 \text{ В}.$$

Фазное напряжение обмотки статора:

$$U_\Phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В}.$$

Отсюда э.д.с. в фазе обмотки статора от подводимого напряжения:

$$E_2 = \frac{E_1}{U_\Phi} 100\% = \frac{217,5 \cdot 100}{220} = 98,8\%.$$

2. Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором марки АО2-82-6 имеет следующие паспортные данные: напряжение  $U = 220/380 \text{ В}$ , номинальная мощность  $P_2 = 40 \text{ кВт}$ , частота вращения

$n_2=980$  об/мин, к.п.д.  $\eta = 91,5 \%$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,91$ , кратность пускового тока  $K_I = 5$ , кратность пускового момента  $K_M = 1,1$ , перегрузочная способность двигателя  $\lambda = 1,8$ . Определить число пар полюсов, номинальное скольжение, номинальные максимальный и пусковой вращающие моменты, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмотки статора в треугольник и звезду. Возможен ли пуск нагруженного двигателя, если подводимое напряжение на 10% ниже номинального и пуск производится путем переключения обмоток статора со звезды на треугольник от сети с напряжением  $U = 220$  В?

*Решение*

Для определения числа пар полюсов можно воспользоваться маркировкой двигателя, частотой вращения магнитного поля или ротора.

Если известна маркировка, то последнее число в марке двигателя означает количество полюсов. В данном двигателе шесть полюсов, следовательно, три пары ( $p=3$ ). При известной частоте вращения магнитного поля число пар полюсов определяем по формуле

$$p = \frac{60f}{n_i}.$$

По этой же формуле определяем число пар полюсов, если задана частота вращения ротора, но в этом случае получаемый результат округляем до ближайшего целого числа. Например, для заданных условий

$$p = \frac{60f}{n_2} = \frac{3000}{980} = 3,06,$$

отбросив сотые доли, получаем число пар полюсов двигателя – 3.

Частота вращения магнитного поля:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Номинальное значение скольжения:

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% = \frac{1000 - 980}{1000} = 2\%.$$

Мощность, потребляемая двигателем:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{40000}{0,915} = 43715 \text{ Вт.}$$

Номинальный вращающий момент двигателя:

$$M_{\text{ном}} = \frac{9,55P_2}{n_2} = \frac{9,55 \cdot 40000}{980} = 389,8 \text{ Н·м.}$$

Максимальный момент:

$$M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 389,8 = 701,6 \text{ Н·м.}$$

Пусковой момент:

$$M_{\text{II}} = K_M M_{\text{ном}} = 1,1 \cdot 389,8 = 428,7 \text{ Н·м.}$$

Для определения фазных, линейных и пусковых токов (фазными токами являются токи в обмотках статора, линейными – токи в подводящих проводах) нужно учесть, что если двигатель рассчитан на работу от сети переменного тока с напряжением 220/380 В, то это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение 220 В. Обмотку необходимо включить по схеме «треугольник», если в сети линейное напряжение  $U_1=220$  В, и по схеме «звезда», если в сети линейное напряжение  $U_1=380$  В.

Определим фазный, линейный и пусковой токи при линейном напряжении  $U_1=220$  В и соединении обмотки статора по схеме «треугольник».

Фазный ток в обмотке статора:

$$I_{\Phi} = \frac{P_1}{3U_{\Phi} \cos \varphi} = \frac{43715,8}{3 \cdot 220 \cdot 0,91} = 72,8 \text{ А},$$

линейный ток

$$I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\Phi} = 1,73 \cdot 72,8 = 125,9 \text{ А},$$

пусковой ток

$$I_{\text{П}} = K_I I_{\text{Л}} = 5 \cdot 125,9 = 629,5 \text{ А}.$$

Найдем значения фазных, линейных и пусковых токов, если обмотки статора включены по схеме «звезда» и подключены к сети с линейным напряжением  $U_1 = 380$  В.

Значение фазного тока найдем из формулы мощностей для линейных значений токов и напряжений

$$P_1 = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos \varphi.$$

При соединении обмоток в звезду линейный ток равен фазному значению:

$$I_{\Phi} = I_{\text{Л}} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos \varphi} = \frac{43715,8}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,91} = 73 \text{ А},$$

пусковой ток

$$I_{\text{П}} = K_I I_{\text{Л}} = 5 \cdot 73 = 365 \text{ А}.$$

Из сопоставления фазных, линейных и пусковых токов при различных соединениях обмоток можно заметить, что фазные токи оказались практически одинаковыми, а линейные и пусковые – различными.

Для определения возможности пуска в ход двигателя, находящегося под номинальной нагрузкой и пониженным напряжением, необходимо определить пусковой вращающий момент при пониженном напряжении.

В соответствии с формулой  $M = C \cdot U^2$  вращающий момент двигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения. При понижении



напряжения на 10 % вращающий момент  $M' = C \cdot (0,95 U_{\text{ном}})^2 = 0,81 \cdot M_{\text{ном}} = 0,81 \cdot 389,8 = 315,74 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Соответственно пусковой момент

$$M'_{\text{п}} = K_M M' = 1,1 \cdot 315,74 = 347,3 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

что меньше тормозного момента на валу на 42,5 Н·м, т.е. пуск невозможен.

Для понижения пусковых токов часто пуск асинхронных двигателей осуществляют при пониженном напряжении. Двигатели, работающие при соединении обмоток статора по схеме «треугольник», пускают без нагрузки путем переключения обмоток со звезды на треугольник. Определим пусковой момент двигателя при данном виде пуска. В момент пуска обмотки находятся под напряжением  $U_{\Phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ В}$ , что составляет

57,7 %  $U_{\text{ном}}$ , пусковой момент при переключении обмоток  $M_{\text{п}} = C \cdot U^2 = C(0,577 \cdot U_{\text{ном}})^2 = 0,33 \cdot U_{\text{ном}}^2 = 0,33 \cdot M_{\text{ном}} = 128,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , т.е. в три раза меньше номинального значения.

3. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором единой серии А02-92-6 имеет следующие технические характеристики: номинальная мощность на валу кВт, номинальное напряжение сети  $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$ , номинальное скольжение коэффициент полезного действия  $\eta = 92,5 \%$ , коэффициент мощности при номинальной нагрузке  $\cos \varphi = 0,92$ , при холостом ходе  $\cos \varphi = 0,2$ , кратность пускового тока  $K_I = 6$ ; кратность пускового момента  $K_M = 1,1$ , кратность максимального момента  $K_{\text{max}} = 1,8$ . Определить номинальный, максимальный и пусковой вращающие моменты, фазный, линейный и пусковой токи при номинальной нагрузке, ток холостого хода, потери энергии в роторе, общее, активное и индуктивное сопротивления фазы при номинальной нагрузке, частоту вращения ротора при максимальной нагрузке, частоту тока ротора при номинальной и максимальной нагрузках.

*Решение*

Определяем частоту вращения магнитного поля. Число пар полюсов двигателя указано в обозначении типа двигателя ( $p = 3$ ); для единой серии А2 частота тока  $f = 50 \text{ Гц}$ , тогда

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Число оборотов ротора при номинальной нагрузке и при известном скольжении  $n_{2\text{ном}} = n_1(1 - s) = 1000(1 - 0,015) = 985 \text{ об/мин.}$

Номинальный вращающий момент:

$$M_{\text{ном}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}} = \frac{9,55 \cdot 75000}{985} = 727 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Максимальный вращающий момент:

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 727 = 1308,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Пусковой вращающий момент:

$$M_{\Pi} = \frac{K_M}{M_{\text{ном}}} = \frac{1,1}{727} = 799,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = \frac{75000}{0,925} = 81081 \text{ Вт}.$$

Из формулы мощности  $P_1 = 3U_{\Phi}I_{\Phi}\cos\varphi$  определяем номинальный фазный ток в обмотках статора при соединении в треугольник:

$$I_{\Phi\text{ном}} = \frac{P_1}{3U_{\Phi}\cos\varphi} = \frac{81081}{3 \cdot 220 \cdot 0,92} = 133,5 \text{ А}.$$

Линейный номинальный ток:

$$I_{\text{Лном}} = \sqrt{3}I_{\Phi\text{ном}} = 1,73 \cdot 133,5 = 231 \text{ А}.$$

Умножая линейный ток на кратность пускового тока, получаем пусковой ток:

$$I_{\Pi} = K_I \cdot I_{\text{ном}} = 6 \cdot 231 = 1386 \text{ А}.$$

Общие потери двигателя составляют разность между потребляемой и номинальной мощностью:

$$\Sigma P = P_1 - P_{\text{ном}} = 81081 - 75000 = 6081 \text{ Вт}.$$

Ток холостого хода определяем из формулы мощности холостого хода:

$$P_X = \sqrt{3}U_{\Phi}I_{\Phi}\cos\varphi,$$

$$\text{откуда } I_X = \frac{P_X}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}\cos\varphi_X} = \frac{6081}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,2} = 79,9 \text{ А}.$$

Электромагнитную мощность, т.е. мощность, передаваемую электромагнитным путем из статора в ротор, определяем как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения магнитного поля:

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{ном}}\omega_1 = M_{\text{ном}} \frac{2\pi n_1}{9,55} = 76125 \text{ Вт}.$$

Потери энергии в статоре при номинальной мощности:

$$P_c = P_1 - P_{\text{эм}} = 81081 - 76125 = 4956 \text{ Вт}.$$

Потери энергии в роторе:

$$P_p = \Sigma P - P_c = 81081 - 4956 = 1125 \text{ Вт}.$$

Общее сопротивление фазы при номинальной нагрузке:

$$Z_{\Phi} = \frac{U_{\Phi\text{ном}}}{I_{\Phi\text{ном}}} = \frac{220}{133,5} = 1,65 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление фазы:  $R_{\Phi} = Z_{\Phi}\cos\varphi \cdot 0,92 = 1,5 \text{ Ом}.$

Индуктивное сопротивление:  $X_{\Phi} = \sqrt{Z_{\Phi}^2 - R_{\Phi}^2} = \sqrt{1,65^2 - 1,5^2} = 0,68 \text{ Ом}$ .

Критическое скольжение — это скольжение, при котором двигатель развивает максимальный вращающий момент:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,015 \left( 1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,049.$$

Частота вращения ротора при максимальной нагрузке:

$$n_{2\text{кр}} = n_1(1 - s_{\text{кр}}) = 1000(1 - 0,049) = 951 \text{ об/мин.}$$

Частота тока ротора при номинальной нагрузке:

$$f_{2\text{ном}} = f_1 \cdot s_{\text{кр}} = 50 \cdot 0,015 = 0,75 \text{ Гц.}$$

Частота тока ротора при максимальной нагрузке:

$$f_{2\text{max}} = f_1 \cdot s_{\text{кр}} = 50 \cdot 0,049 = 2,45 \text{ Гц.}$$

## 2.5. Синхронные электрические машины

### *Назначение, разновидности и устройство*

*Синхронными* называют такие машины, в которых ротор и магнитное поле статора вращаются с одинаковой скоростью, т.е. *синхронно*, что позволяет достичь либо постоянства частоты колебаний выходного напряжения (при работе в режиме генератора), либо постоянства частоты вращения вала при работе в режиме двигателя.

Эти машины также обратимы и более распространены как генераторы переменного тока. Трехфазные синхронные генераторы – самые мощные электрические машины (до 640 МВт для ГЭС и до 1200 МВт – для ТЭС). Трехфазные синхронные двигатели также являются самыми мощными среди всех электродвигателей. Важной особенностью синхронных машин, работающих в энергосистемах, является способность изменения (регулирования) коэффициента мощности систем энергоснабжения как по характеру, так и по значению.

Для этой цели созданы специальные синхронные двигатели, которые при работе в режиме «холостого хода» потребляют опережающий (или отстающий) по фазе ток и тем самым компенсируют реактивную мощность. Их мощность достигает 50, 100 и даже 160 МВАр. Считается, что синхронные двигатели мощностью более 100 кВт имеют некоторое преимущество перед асинхронными, хотя они сложнее в эксплуатации и дороже асинхронных. Синхронные микродвигатели от 1 Вт до 1 кВт более просты в конструкции, а постоянство их скорости вращения обусловило широкое их использование в системах аудио– и видеозаписи в радио– и телестудиях.

Статор синхронной машины ничем не отличается от статора асинхронной машины. В его пазах располагается трехфазная обмотка,

обычно соединенная «звездой» и фазное напряжение в ней при генераторном режиме работы достигает 24...30 кВ. Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током. На рис. 2.5.1, *а* и *б* представлены электрические схемы статора и ротора, а также условное графическое обозначение машины в схемах, соответственно.

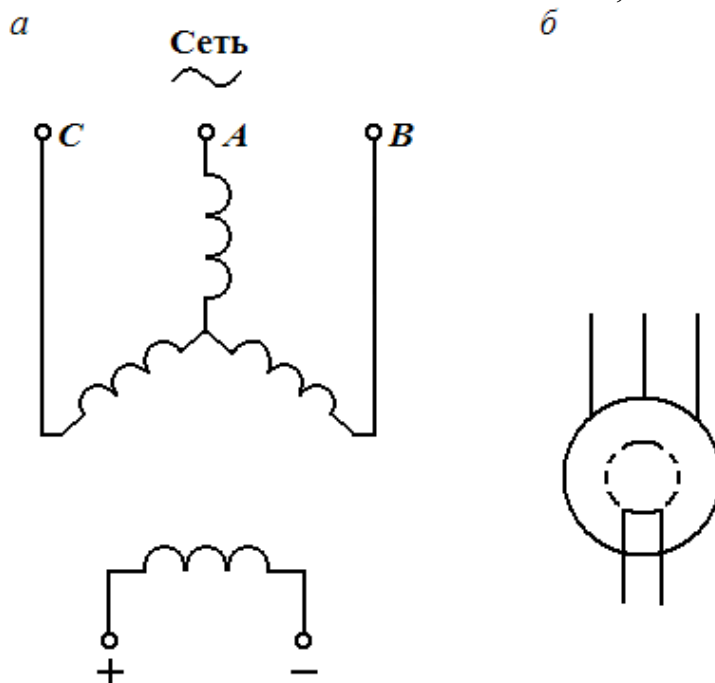


Рис. 2.5.1. Схемы включения обмоток статора и ротора синхронной машины (*а*), условное обозначение синхронной машины (*б*)

Концы роторной обмотки выводятся через полый вал к двум контактными кольцам на валу, к которым прижимаются угольные щетки с подключенным к ним источником питания постоянного тока. Роторная обмотка является обмоткой возбуждения. Магнитное поле ротора считается основным, причем число ( $2p$ ) его полюсов зависит от скорости его вращения, выражаемой в об/мин по формуле  $n_0 = \frac{60f}{p}$ . При частоте гене-

рируемого напряжения 50 Гц наибольшую скорость вращения (3000 об/мин) имеют 2-полюсные роторы.

На тепловых и атомных электростанциях роторы синхронных генераторов вращают паровые турбины со скоростью 3000 и 1500 об/мин. Ротор самого мощного турбогенератора представляет собой стальной цилиндр диаметром 1,3 м и длиной до 8 м. Линейная скорость проводников обмотки ротора достигает 700 км/час. Гидрогенераторы являются тихоходными машинами. Например, ротор одной из таких машины диаметром 18 м вращается вертикально с частотой 83,3 об/мин и имеет 72 полюса.

### Принцип действия синхронного генератора

Для реализации генераторного режима (рис. 2.5.2) в обмотку ротора синхронной машины требуется подать постоянное напряжение и обеспечить непрерывное вращение его в любую сторону с постоянной скоростью  $n_0$ . Обмотки статора могут быть подключены к трехфазной сети.

В обмотке ротора возбуждается постоянное магнитное поле, при вращении которого в обмотках статора будут индуцироваться э.д.с.  $\dot{E}_A, \dot{E}_B$  и  $\dot{E}_C$ . Поскольку магнитное поле ротора зависит от тока возбуждения  $I_B$ , то и значения генерируемых Э.Д.С. также связаны с током возбуждения, что видно из формулы  $E = 4,44 \cdot k \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m$ , где  $k$  – обмоточный коэффициент,  $w$  – число витков одной фазы статора,  $\Phi_m$  – максимальный магнитный поток полюсов ротора. Так как  $n_0 = \text{const}$ , то частота  $f = \frac{pn_0}{60}$  выходных э.д.с.

также постоянна, а зависимость  $E = f(I_B)$  подобна зависимости  $\Phi_m$  от тока возбуждения  $I_B$  (или В от Н в основной петле гистерезиса).

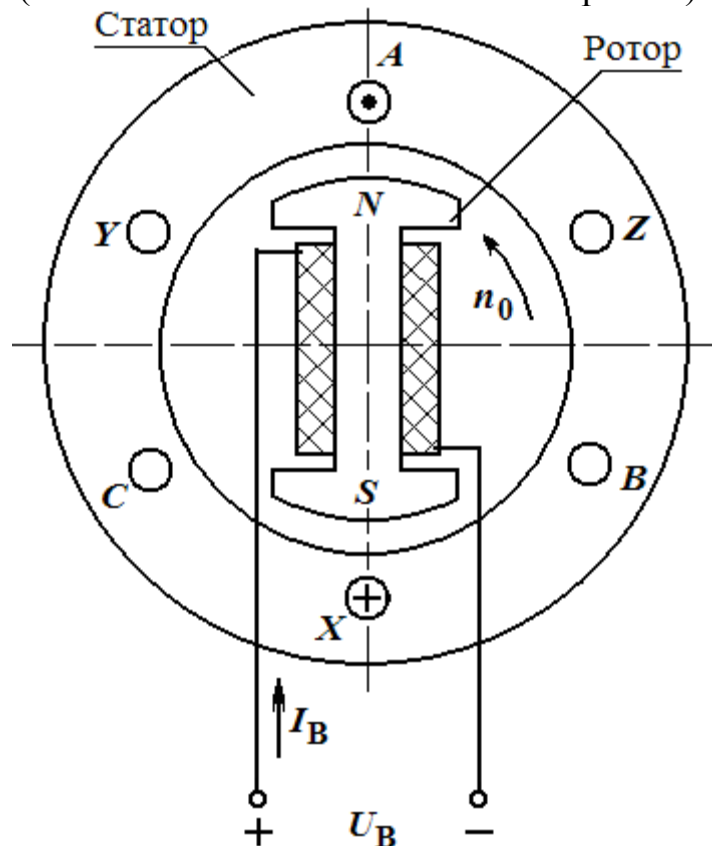


Рис. 2.5.2. Включение синхронной машины в режиме генератора

В машине, работающей под нагрузкой, т.е. при  $I_C \neq 0$ , магнитный поток в роторе создается не только током  $I_B$  возбуждения, но и током  $I_C$  статора. Воздействие тока статора на поле ротора называется *реакцией якоря*. В результате ее действия одна половина каждого полюса размагничивается, а другая половина – подмагничивается и распределение индукции в

воздушных зазорах машины искажается. Поскольку полный магнитный поток равен сумме потоков ротора и статора, т.е.  $\Phi_m = \Phi_r + \Phi_s$ , то э.д.с. индукции в обмотках статора также возрастает.

Электрическая мощность синхронного генератора при симметричной нагрузке равна:  $P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$ .

Механическая мощность приводного двигателя равна:  $P_{\text{мх}} = M \cdot \omega_0$ , где  $M$  – противодействующий момент со стороны генератора (момент сопротивления вращающегося ротора);  $\omega_0$  – частота вращения ротора, причем  $\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi f}{p}$ .

Механическая мощность  $P_{\text{мх}}$  генератором преобразуется в электрическую мощность  $P$ , оказывая тормозящее действие с моментом  $M = \frac{3U \cdot I \cdot \cos \phi}{\omega_0}$  на приводной двигатель.

## 2.6. Электропривод

*Назначение и классификация электропривода, состав и принцип действия*

**Электропривод (ЭП)** – электромеханическое устройство, предназначенное для автоматизации рабочих процессов и осуществляющее преобразование электрической энергии в механическую с электрическим управлением преобразованной энергией. Основным элементом ЭП (рис. 2.6.1) является электродвигатель (ЭД), который превращает электрическую энергию (ЭЭ) в механическую энергию (МЭ), в частности, в энергию вращения ротора ЭД. Редуктор согласует ЭД с исполнительным органом рабочей машины по моменту вращения  $M$  и по угловой частоте  $\omega$ .

Кроме того, ЭП содержит систему управления, состоящую из силового преобразователя и блока управления (БУ), на который поступают задающий  $U_z$  сигнал и сигналы с датчиков  $U_d$ , несущие информацию о характере движения исполнительного органа рабочей машины (РМ), работе отдельных узлов ЭП, аварийных ситуациях и т.п.. Выходным сигналом БУ является управляющий сигнал  $U_y$ . В качестве силового преобразователя в схеме может быть трансформатор, тиристорная схема, генератор постоянного тока и т.п. По степени участия человека различают следующие виды ЭП:

- неавтоматизированный;
- автоматизированный;
- автоматический.

В *автоматизированном* ЭП человек участвует только при пуске, а в *неавтоматизированном* – он принимает участие периодически (при отклонении в работе ЭП от заданного режима). В зависимости от числа ЭД ЭП делятся на: групповой, индивидуальный и многодвигательный. В

групповых ЭП один (общий) ЭД с помощью механической передачи (трансмиссии) приводит в действие исполнительные органы нескольких рабочих машин. *Индивидуальный ЭП* обеспечивает движение исполнительных органов одной рабочей машины. В *многодвигательных ЭП* каждый орган рабочего механизма приводится в действие отдельным ЭД. Так, например, на расточном станке вращение фрезы производится одним двигателем, продольное перемещение детали – другим ЭД, а поперечное перемещение – третьего.



Рис. 2.6.1. Структурная схема электропривода

### Управление движения электропривода

Для правильного выбора ЭД требуется знать кинематику ЭП и условия эксплуатации рабочей машины. ЭД и приводимый им во вращение исполнительный механизм образуют механическую систему. Развиваемый ЭД на своем валу момент  $M_{дв}$  должен приводить всю систему в движение. Если при этом окажется, что ЭД вращается с постоянной скоростью, то вращающий  $M_{дв}$  момент двигателя преодолевает моменты сопротивления статической  $M_c$  и динамической  $M_d$  нагрузки. Эти все моменты должны приводиться к вращающемуся валу ЭД.

Статический момент  $M_C$  сопротивления на валу двигателя обуславливается сопротивлениями сил трения, веса и нагрузкой исполнительного органа производственного механизма. Динамический момент  $M_D$  возникает в системе вследствие изменения скорости движения тех или иных инерционных масс. В соответствии с этим основным уравнением движения ЭП является уравнение моментов, действующих на валу ЭД:

$$M_{ДВ} = M_C + M_D = M_C + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.6.1)$$

где  $J = \sum_{K=1}^N m_K R_K^2$  – приведенный момент инерции вращающихся частей;

$m_K$  – масса отдельной части системы;

$R_K$  – расстояние соответствующей части системы от оси вращения вала двигателя.

Момент  $M_{ДВ}$  и механическая мощность  $P_{ДВ}$ , развиваемая двигателем, связаны между собой известной зависимостью:

$$P_{ДВ} = M_{ДВ} \omega. \quad (2.6.2)$$

Если вместо угловой скорости  $\omega$  (рад/с) воспользоваться частотой вращения  $n$  (об/мин), то последнее выражение примет вид:

$$P_{ДВ} = \frac{M_{ДВ} n}{9550} \text{ (кВт)}. \quad (2.6.3)$$

Безаварийная работа ЭД возможна тогда, когда его действительный режим не превышает номинальных условий эксплуатации, для работы в которых он был спроектирован и построен на заводе. Номинальный режим характеризуется определенной мощностью, напряжением, током, частотой вращения и рядом других параметров, значения которых называются номинальными и указываются в паспорте на ЭД. Номинальный момент в паспорте обычно не указывают и его вычисляют по формуле

$$M_{\text{ном}} = \frac{9950 \cdot P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}.$$

#### *Механические характеристики производственных механизмов и приводных двигателей*

В установившемся режиме скорость ЭП определяется точкой пересечения механических характеристик (МХ) ЭД и производственного механизма (ПМ). МХ производственного механизма представляет собой зависимость  $\omega = f(M_C)$ . Их разнообразие приведено на рис. 2.6.2, а. Момент сопротивления  $M_C$  может зависеть от ряда факторов: скорости, пути,



времени, угла поворота и т.д. У некоторых механизмов  $M_C$  не зависит от  $\omega$ . Это грузоподъемные и транспортные механизмы: лифты, транспортеры (линия 1 на рис. 2.6.2, а).

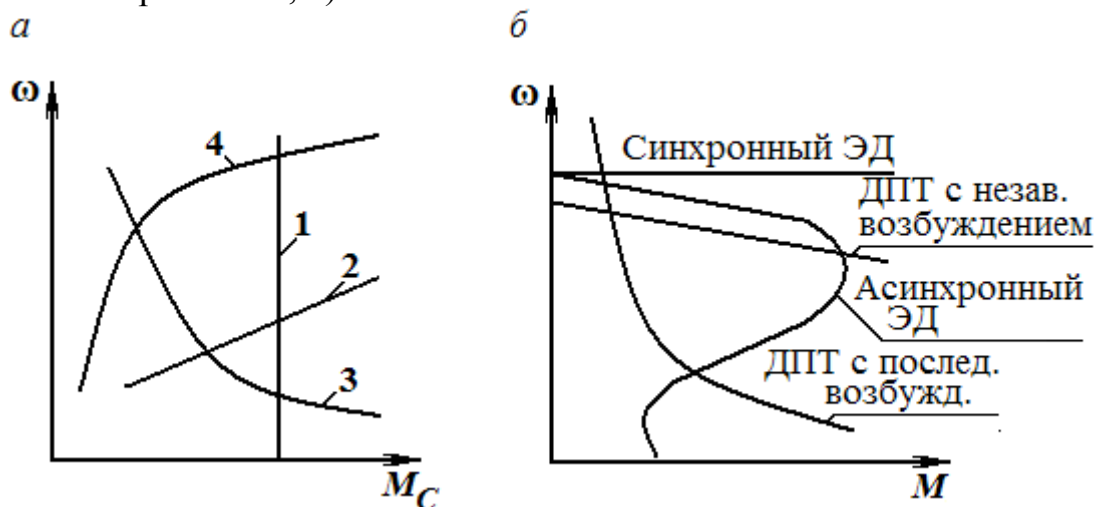


Рис. 2.6.2. Механические характеристики производственного механизма (а), механические характеристики различных электрических двигателей (б)

Линейно-возрастающая зависимость  $M_C(\omega)$  имеет привод генератора постоянного тока, работающего на постоянную нагрузку (линия 2). МХ механизма, работающего при постоянной мощности ( $P = \text{const}$ ), имеет вид кривой 3 на рис. 2.6.2, а. Центробежные насосы, компрессоры, вентиляторы имеют МХ типа  $M_C = k \cdot \omega^n$  при  $n > 1$  (кривая 4). Степень изменения моментов  $M$  и  $M_C$  от изменения  $\omega$  характеризует коэффициент  $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$ , который называется *жесткостью* МХ. Характеристики с большим отрицательным значением  $\beta$  называются жесткими, а с малым отрицательным  $\beta$  – *мягкими*.

Графики МХ различных ЭД, представляющие собой зависимости момента вращения  $M$  от угловой скорости  $\omega$ , приведены на рис. 2.6.2, б.

### *Нагревание и охлаждение электродвигателя*

Мощность выбираемого ЭД для работы в ЭП определяется, в конечном счете, допустимой температурой нагрева его изоляции. В современных ЭД применяются следующие классы изоляции, допустимая температура которых составляет: для класса *A* – 105°C, *E* – до 120°C, *B* – до 130°C, *F* – 155°C, *H* – 180°C, *C* – свыше 180°C. Превышение ее ведет к преждевременному разрушению изоляции и сокращению срока службы ЭД. Рассмотрим законы нагрева и охлаждения ЭД.

В работающем ЭД имеются потери энергии, которые вызывают нагрев машины. Мощность этих потерь  $\Delta P$  тем больше, чем большую мощность развивает ЭД на валу  $P_{\text{ДВ}}$  и чем ниже его к.п.д.  $\eta$ :

$$\Delta P = \frac{P_{\text{ДВ}}}{\frac{1}{\eta} - 1}. \quad (2.6.4)$$

Для упрощения расчетов теплового баланса приняты следующие допущения:

- двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех точках;
- теплоемкость  $C$  двигателя и его коэффициент  $A$  теплоотдачи не зависит от температуры двигателя.

Поскольку температура ЭД зависит не только от его нагрузки, но и от температуры окружающей среды (принимают равной  $+40^\circ$ ), то при расчетах учитывают разность этих температур и называют это *превышением температуры*  $\tau$ .

Для принятых допущений уравнение теплового баланса ЭД при постоянной нагрузке имеет вид:

$$\Delta P \cdot d\tau = C \cdot d\tau + A \cdot \tau \cdot dt, \quad (2.6.5)$$

где  $\Delta P$  – мощность потерь в двигателе, принятая постоянной на любом интервале  $\Delta t$ .

При длительной работе ЭД за время  $t = \infty$  наступает тепловое равновесие и повышение температуры его прекращается ( $d\tau = 0$ ). Установившаяся температура перегрева приобретает следующее значение:

$$\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A}. \quad (2.6.6)$$

Каждой нагрузке и каждой величине  $\Delta P$  будет соответствовать своя установившаяся температура перегрева. Очевидно, что двигатель можно нагружать только такой мощностью, при которой установившийся перегрев ее изоляции не превышает максимально допустимого значения. Эту мощность называют *номинальной*. Увеличению номинальной мощности способствует повышение коэффициента  $A$  теплоотдачи, для чего ЭД снабжают вентиляторами, а корпус изготавливают ребристой формы (для увеличения охлаждающей поверхности).

Разделим уравнение (2.6.5) на величину  $A dt$  и с учетом (2.6.6) перепишем его в виде

$$T_H \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}}, \quad (2.6.7)$$

где  $T_H = \frac{C}{A}$  – постоянная времени нагрева двигателя.

Исследования показали, что изменение температуры ЭД при его нагревании и охлаждении происходит по закону экспоненты. При нагревании имеем:

$$\tau = \tau_{уст} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right); \quad (2.6.8)$$

при охлаждении

$$\tau = \tau_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (2.6.9)$$

где  $\tau_{нач}$  – начальная температура перегрева;

$T_{охл} = \frac{C}{A_{охл}}$  – постоянная времени охлаждения ЭД;

$A_{охл}$  – коэффициент теплоотдачи ЭД в процессе охлаждения;

$C$  – теплоемкость ЭД, Вт·с/град. На рис. 2.6.3 приведены примерные кривые нагрева и охлаждения ЭД. Практически время  $t_H$  нагрева двигателя равно:  $t_H = (3...5)T_H$ , а охлаждения  $t_{охл} = (3...5)T_{охл}$ , причем  $T_{охл}$  в ЭД с самовентиляцией всегда больше  $T_H$ .

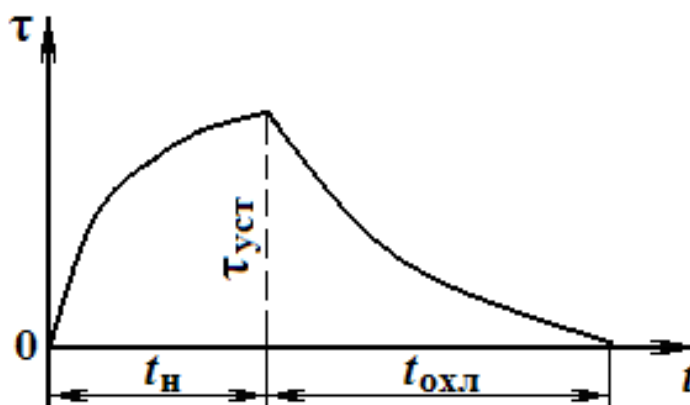


Рис. 2.6.3. Кривые нагрева и охлаждения электрического двигателя.  
Режимы работы и выбор мощности электродвигателя

Характер изменения нагрузки рабочего механизма определяет режим работы ЭД. Чтобы учесть эти изменения, строят нагрузочные диаграммы, представляющие собой зависимость мощности, тока или вращающего момента двигателя от времени. Различают следующие режимы работы ЭД:

- 1) длительный (S1);
- 2) кратковременный (S2);
- 3) повторно-кратковременный (S3).

Для каждого из них различны условия нагрева и охлаждения.

Длительным называется режим, в котором температура перегрева достигает установившегося значения. Различают длительный режим с постоянной и с переменной нагрузкой. Графики изменения мощности на валу  $P_2$ , момента  $M$ , потерь  $\Delta P$  и перегрева  $\tau$  для длительного режима с постоянной нагрузкой приведены на рис. 2.6.4, а. На рис. 2.6.4, б приведены нагрузочные диаграммы ЭД, работающего с длительной переменной нагрузкой. Признаком режима S1 является выполнение условия  $t_p > T_H$ , где  $t_p$  – время работы (включения) двигателя.

При работе с постоянной нагрузкой мощность ЭД подбирается по мощности рабочей машины. Необходимо лишь проверить, достаточен ли пусковой момент двигателя для пуска данной машины. Мощность длительного режима работы с постоянной нагрузкой ряда хорошо известных машин определяется на основании проверенных практикой теоретических расчетов и формул. По рассчитанной мощности  $P_{\text{РАС}}$  в каталогах выбирают двигатель с  $P_{\text{ДВ.НОМ}} \geq P_{\text{РАС}}$ .

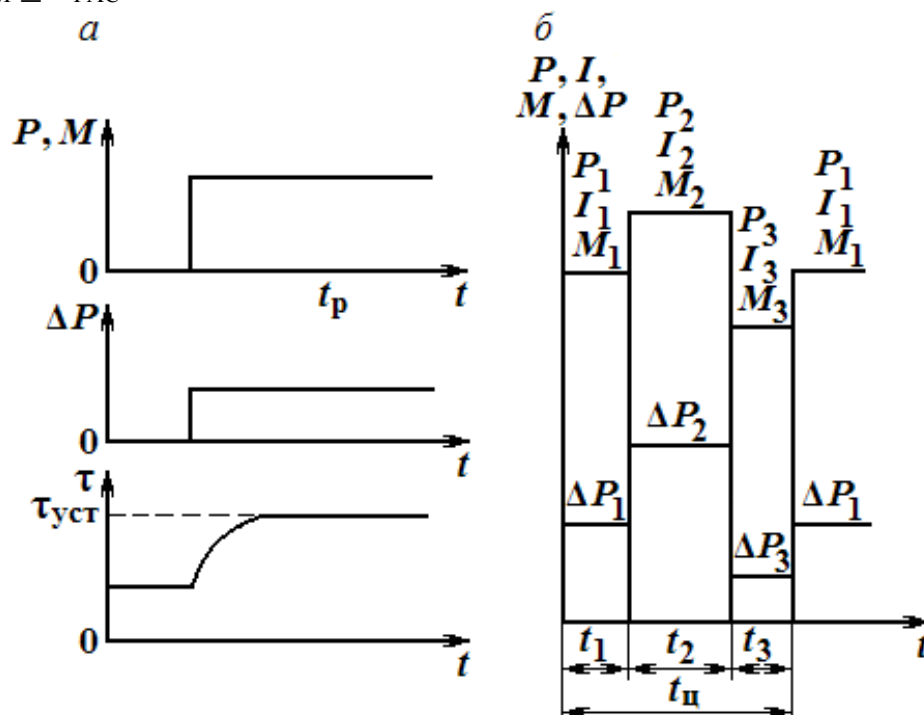


Рис. 2.6.4. Временные графики параметров электродвигателя (а) и его нагрузочные диаграммы (б)

Если режим работы длительный, но с переменной нагрузкой (рис. 2.6.4, б), то мощность ЭД рассчитывается по методу эквивалентных величин (тока, момента и мощности). В основе этого метода лежат следующие положения. Поскольку мощность переменных потерь в ЭД пропорциональна квадрату его рабочего тока, то изменяющийся по величине ток нагрузки можно заменить эквивалентным неизменным  $I_{\text{ЭК}}$ , который выделяет

в двигателе ту же теплоту. Тогда по нагрузочной диаграмме рабочего тока (рис. 2.6.4, б) можно определить  $I_{ЭК}$ :

$$I_{ЭК} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (2.6.10)$$

Зная  $I_{ЭК}$ , номинальное напряжение и номинальный коэффициент мощности, можно определить номинальную мощность ЭД:

$$P_{ДВ.НОМ} \geq U_{НОМ} \cdot I_{ЭК} \cdot \cos \varphi_{НОМ}. \quad (2.6.11)$$

Выбранный ЭД проверяется также по току, исходя из условия

$$I_{ЭК} \leq I_{ДВ.НОМ}.$$

Часто приходится иметь дело с нагрузочными диаграммами моментов или мощностей. Если момент ЭД пропорционален току, то формула для эквивалентного момента  $M_{ЭК}$  аналогична формуле (2.6.10), если заменить в ней  $I_i$  на  $M_i$ . Выбор двигателя считается правильным, если  $M_{НОМ}$  предварительно выбранного ЭД удовлетворяет условию  $M_{НОМ} \geq M_{ЭК}$ . Также аналогично может быть определена  $P_{ЭК} = M_{ЭК} \cdot \omega$  будущего ЭД. Тогда условие соответствия его имеет вид:  $P_{ДВ.НОМ} \geq P_{ЭК}$ .

Второй режим характеризуется ограниченным временем работы ЭД с неизменной нагрузкой, за которое превышение температуры не достигает установившегося значения. Паузы в работе настолько велики, что ЭД успевает полностью охладиться. Стандартные значения времени  $t_P$  работы двигателя с номинальной мощностью составляют 10, 30, 60 и 90 мин. Графики работы ЭД в кратковременном режиме приведены на рис. 2.6.5, а.

Если взять ЭД с  $P_{ДВ.НОМ} = P$ , то за время  $t_P$  работы он не успеет нагреться до допустимой температуры, т.е. ЭД будет не загружен по нагреву или недоиспользован. Поэтому следует выбрать ЭД с  $P_{ДВ.НОМ}$  меньшей, чем  $P$  механической системы, так, чтобы температура его перегрева через время  $t_P$  достигла допустимого значения. Затем этот ЭД должен быть проверен на тепловую перегрузку. Коэффициент тепловой перегрузки  $\alpha_T = \Delta P_K / \Delta P_{НОМ}$ , где  $\Delta P_K$  – потери мощности при кратковременной нагрузке, а  $\Delta P_{НОМ}$  – потери мощности при длительной нагрузке.

*Повторно-кратковременный режим* (режим 3 или S3) характеризуется кратковременными периодами работы с неизменной нагрузкой, которые чередуются с кратковременными периодами отключения ЭД (паузами). Этому режиму соответствуют условия:  $t_P < 3T_H$  и  $t_0 < 3T_{ОХЛ}$ . Графики нагрузки и превышения температуры этого режима приведены на рис. 2.6.5, б.

Для этого режима существенную роль при выборе мощности ЭД имеет значение относительной продолжительности его включения, т.е. ПВ %:

$$ПВ\% = \left( \frac{t_P}{t_{Ц}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{t_P}{t_P + t_0} \right) \cdot 100, \quad (2.6.12)$$

где  $t_p$  – время работы двигателя;  
 $t_0$  – продолжительность паузы;  
 $t_{\text{ц}}$  – длительность цикла.

Продолжительность цикла режима S3 не должна превышать 10 мин. Для повторно-кратковременного режима выпускаются специальные серии двигателей с указанием стандартизованного значения ПВ % – 15, 25, 40 или 60 %. Если окажется, что ПВ % > 60 %, то ЭД выбирается как для режима S1, если ПВ % < 10 % – как для кратковременного режима работы, т.е. для режима S2.

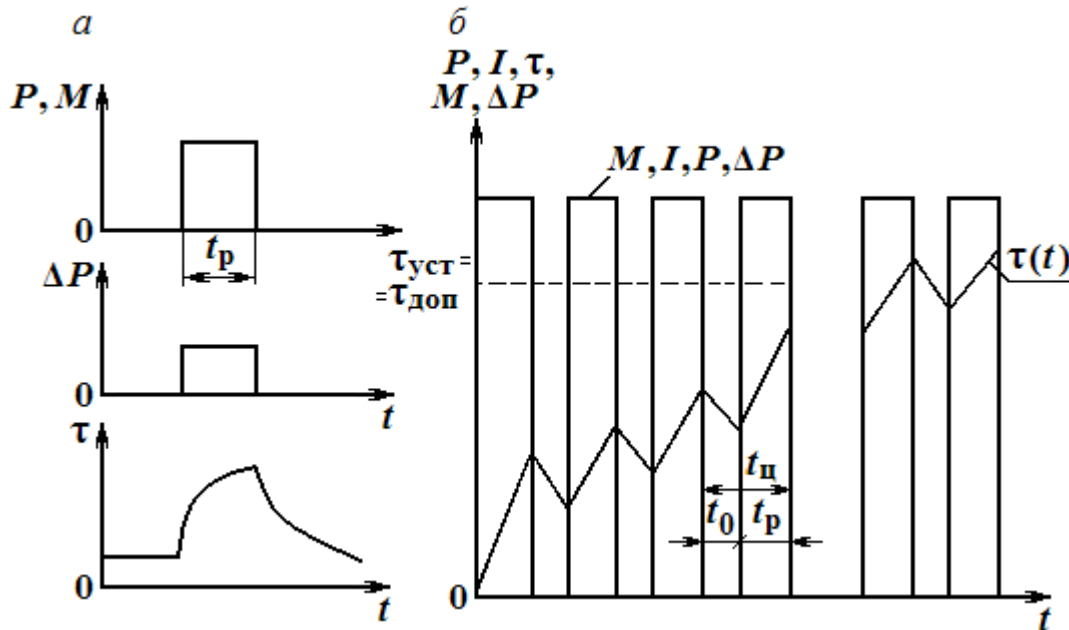


Рис. 2.6.5. График работы электродвигателя в кратковременном режиме (а), графики нагрузки и превышения температуры в кратковременном режиме (б)

Если же ПВ % оказывается вне указанных границ, то рассчитывают  $P_{\text{ЭК}}$  по формуле, подобной (2.6.10), затем определяют по нагрузочной диаграмме значение реальной относительной продолжительности включенного состояния ПВр %. Затем найденную  $P_{\text{ЭК}}$  пересчитывают до ближайшего стандартного значения ПВ % по упрощенной формуле, беря значения относительной продолжительности включенного состояния в относительных единицах:

$$P = P_{\text{ЭК}} \sqrt{\frac{\text{ПВр}}{\text{ПВ}}} . \quad (2.6.13)$$

По каталогу выбирается двигатель с  $P_{\text{ДВ.ном}} \geq P$  при используемой в расчетах ПВ %.

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Выбрать асинхронный двигатель для вентилятора, если при частоте вращения  $n_1 = 475$  об/мин вращающий момент  $M = 10$  Нм. Номинальная частота вращения вентилятора  $n_2 = 950$  об/мин, а зависимость момента вентилятора от частоты вращения задана уравнением:  $M_2 = M_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$ .

*Решение*

Определяем момент, необходимый для вращения при номинальной частоте вращения:

$$M_2 = M_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 = 10 \left( \frac{950}{475} \right)^2 = 40 \text{ Н·м.}$$

Находим мощность АД:

$$P = \frac{M \cdot n_2}{9550} = \frac{40 \cdot 950}{9550} = 4 \text{ кВт.}$$

По каталогу выбираем двигатель АО2-42-6 мощностью 4 кВт и частотой вращения  $n = 960$  об/мин.

2. Металлообрабатывающий автомат приводится во вращение двигателем постоянного тока параллельного возбуждения. Напряжение питания ЭД 220 В, частота вращения  $n = 3000$  об/мин. График изменения тока в двигателе задан в таблице.

Т а б л и ц а

Ток, А	40	30	20	40	30	20
Время, с	120	180	300	120	180	300

Подобрать двигатели из серии П, который обеспечит работу автомата.

*Решение*

Определяет эквивалентный ток двигателя:

$$I_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{\sum I^2 t}{\sum t}} = \sqrt{\frac{40^2 120 + 30^2 180 + 20^2 300}{120 + 180 + 300}} = 28 \text{ А.}$$

Находим эквивалентную мощность двигателя:

$$P_{\text{ЭК}} = U \cdot I_{\text{ЭК}} = 220 \cdot 28 = 6260 \text{ Вт.}$$

Для длительного режима мощность ЭД выбираем из условия  $P_{\text{ДВ}} \geq P_{\text{МХ}}$ . По каталогу выбираем двигатель П42, имеющий мощность  $P_{\text{ДВ}} = 8$  кВт, частоту вращения  $n = 3000$  об/мин, к.п.д.  $\eta = 0,83$ , номинальный ток  $I_{\text{НОМ}} = 43,5$  А. Номинальный ток превышает максимальное значение тока при нагрузке  $I_{\text{МАХ}} = 40$  А, что предохранит ЭД от перегрева.

## Аппаратура управления

Современные электрические аппараты низкого напряжения разнообразны. По принципу действия различают:

1. *Коммутационные* аппараты ручного управления для включения и отключения электрических цепей путем воздействия на них ручным способом (рубильники, переключатели, кнопки и т.д.)
2. *Электромагнитные* автоматические аппараты, принцип работы которых основан на электромагнитном действии тока (реле, магнитные пускатели, контакторы и т.д.).

По назначению электрические аппараты можно разделить на:

- 1) пускорегулирующие и токоограничивающие аппараты (пусковые реостаты, сопротивления, магнитные пускатели, контакторы);
- 2) аппараты защиты (тепловые реле, предохранители, токовые реле).

Отдельные элементы электрической цепи и провода необходимо защищать от токов короткого замыкания и перегрузок. Простейшей защитой служат плавкие предохранители. Основным элементом предохранителя является его плавкая вставка – тонкая металлическая проволочка или пластинка из свинца. При возрастании тока свыше допустимого значения вставка, включенная последовательно с токонесущим проводом, плавится и отключает защищаемый участок.

Для защиты установки от перегрева токами перегрузки может быть использовано тепловое реле. Основным элементом теплового реле является биметаллическая пластинка, склепанная из металлов с неодинаковыми коэффициентами деформации и включенная последовательно в защищаемую цепь. При нормальном режиме ( $I \leq I_n$ ) нагрев пластинки недостаточен для ее заметной деформации. Когда же ток превышает свое номинальное значение, пластинка от нагревания деформируется и освобождает рычаг, который под действием пружины поворачивается и размыкает контакты, что ведет к отключению защищаемой линии. Включение реле производится нажатием кнопки, действующей на рычаг, после того как биметаллическая пластинка остынет и вернется в исходное положение (3–4 мин).

В аппаратуре управления используются контакторы – аппараты, осуществляющие дистанционное включение и отключение электрических цепей. Трехполюсный контактор имеет три пары нормально открытых (разомкнутых) силовых контактов, рассчитанных на коммутацию больших токов. Эти контакты снабжены дугогасительными камерами, в которых электрическая дуга, возникающая при разведении контактов, гасится из-за малых размеров камер. Кроме силовых контактов, контактор имеет по две пары нормально открытых и нормально закрытых контактов, также предназначенных для переключений в цепях управления и называемых блокировочными.

При подведении к зажимам катушки контактора напряжения сети в магнитопроводе возникает магнитный поток. Под действием силы притяжения якорь электромагнита вместе с валом, на котором укреплены



подвижные контакты, поворачивается и замыкает нормально открытые контакты (размыкает нормально закрытые).

Для дистанционного управления и автоматической защиты асинхронных двигателей часто применяют магнитный пускатель. Он представляет собой трехполюсный контактор переменного тока, укомплектованный тепловыми реле. Нагревательные элементы тепловых реле включаются в два линейных провода цепи и служат для защиты двигателя от перегрузок. Если нагрузка двигателя будет превышать на определенное время допустимую нагрузку на 10...20 %, тепловое реле сработает и своим нормально замкнутым контактом разорвет цепь питания катушки магнитного пускателя.

#### Управление пуском короткозамкнутого асинхронного двигателя

На рис. 2.6.14 показана схема дистанционного управления пуском и остановом асинхронного короткозамкнутого двигателя с помощью магнитного пускателя МП и кнопок С (стоп) и П (пуск).

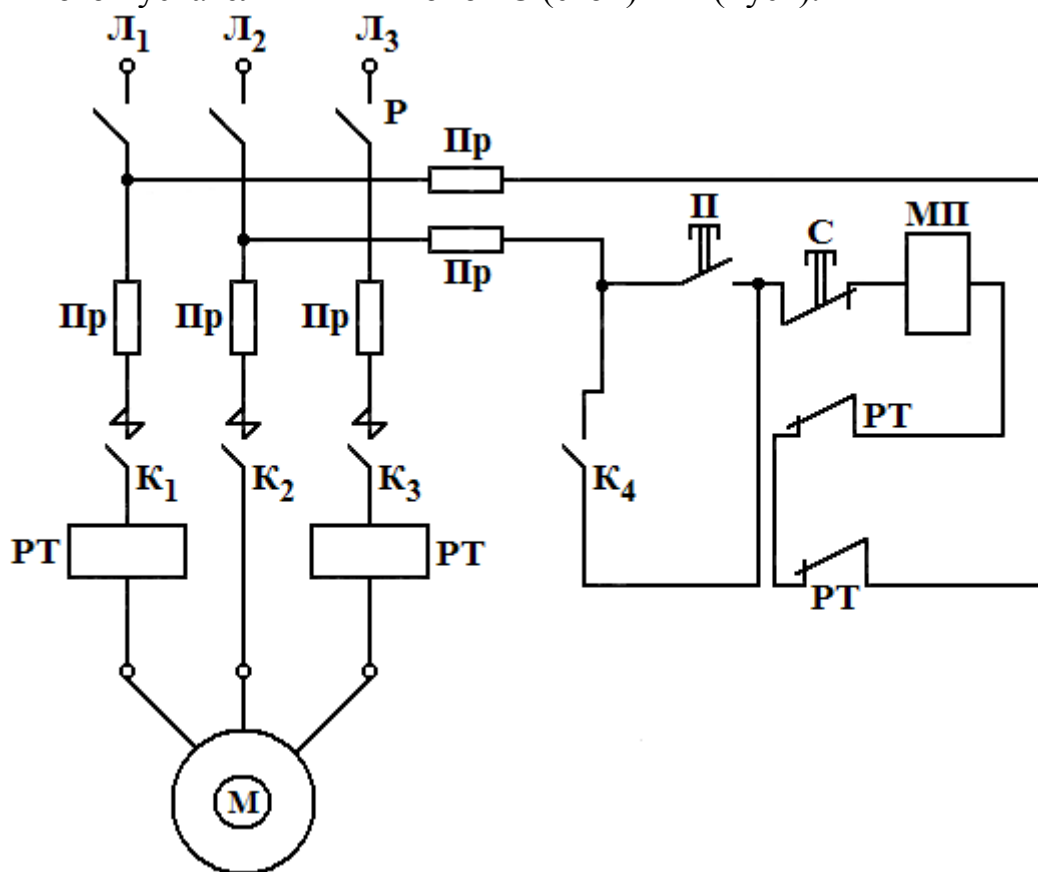


Рис. 2.6.14. Схема дистанционного управления пуском и остановкой асинхронного короткозамкнутого двигателя

В силовую цепь (линейные проводники) включены рубильник Р для снятия напряжения, предохранители Пр, главные контакты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  магнит-

ного пускателя с искрогасительными камерами, тепловые реле РТ магнитного пускателя, служащие для защиты двигателя М от перегрева, вызванного перегрузками. Все элементы магнитного пускателя (силовые контакты К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>, К<sub>3</sub> и дополнительные контакты К<sub>4</sub>, контакты тепловых реле РТ) показаны в нормальном положении, т.е. при выключенном магнитном пускателе.

При пуске двигателя нажимают кнопку П и в цепь управления подается напряжение (линейные провода Л<sub>1</sub> и Л<sub>2</sub>), через катушку магнитного пускателя проходит ток, замыкаются главные контакты К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>, К<sub>3</sub> пускателя и одновременно с ними дополнительные контакты К<sub>4</sub>, шунтирующие кнопку П, возвращающуюся обратно после прекращения нажатия. Цепь управления и прекращения нажатия на кнопку «Пуск» не прерывается, и главные контакты магнитного пускателя остаются включенными. При остановке двигателя нажимают на кнопку С, вследствие чего цепь управления разрывается и двигатель останавливается. При перегрузке двигателя срабатывают тепловые реле РТ, размыкающими контактами РТ отключается от сети цепь катушки магнитного пускателя МП, размыкаются главные контакты пускателя и двигатель, таким образом, отключается от сети.

Для управления асинхронным короткозамкнутым двигателем, который в процессе работы изменяет направление вращения, применяют магнитные пускатели с двумя трехполюсными контакторами, имеющие кнопки В (вперед), Н (назад), С (стоп) и два тепловых реле РТ (рис. 2.6.15).

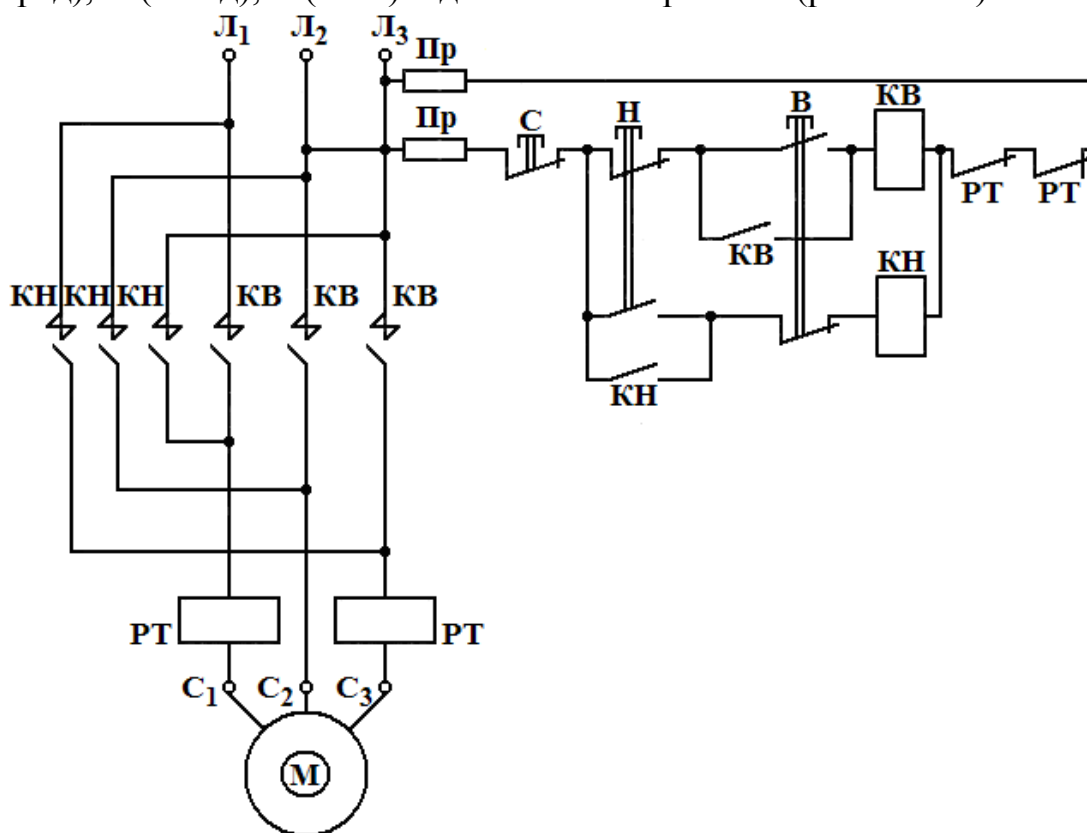


Рис. 2.6.15. Схема реверсивного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем

### Реверсивное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем

В зависимости от требуемого направления вращения контакторы магнитного пускателя переключают две фазы (зажимы  $C_1$  и  $C_3$  электродвигателя). Например, для пуска двигателя в одном из направлений (условно названном «вперед») необходимо нажать на двойную кнопку В, замыкающий контакт которой замкнет цепь катушки КВ одного из контакторов. При этом замкнутся для этого трехполюсного контактора контакты КВ и двигатель начнет вращаться вперед. Одновременно кнопка В шунтируется блокировочными замыкающими контактами КВ.

Если требуется изменить направление вращения двигателя, то необходимо нажать на кнопку Н, размыкающий контакт которой разорвет цепь катушки КВ и отключит контактор КВ, а замыкающий контакт кнопки Н замкнет цепь катушки КН другого трехполюсного контактора КН, вследствие чего включатся контакты КН этого контактора, и двигатель изменит направление вращения.

Блокировочные замыкающие контакты КВ и КН обеспечивают продолжение работы двигателя в выбранном направлении при возвращении контактов пусковых кнопок В и Н в исходное положение. Одновременное включение контакторов КВ и КН недопустимо, так как в этом случае возникнет короткое замыкание сети. Во избежание этого и применяют поочередно кнопки В и Н. Двигатель останавливают вручную путем нажатия на кнопку С, или он останавливается автоматически при перегрузке за счет размыкания контактов тепловых реле РТ.

Схемы релейно-контакторного управления имеют недостатки: громоздкость, относительно малая надежность. Это заставило перейти к системам бесконтактного электромашинного управления. В этих системах имеются регулятор и объект управления регулятора. Кроме прямой связи, между ними существует обратная связь, с помощью которой электрический сигнал с объекта управления воспринимается регулятором через его обмотку управления. Регуляторами в системах бесконтактного электромашинного управления служат электромашинные усилители (выполняется на основе генератора постоянного тока), магнитные усилители, дроссели, специальные генераторы постоянного тока, имеющие несколько обмоток управления, – возбудители.

### Индукционный счетчик электрической энергии

В индукционном счетчике электрической энергии имеются два электромагнита, которые создают вращающееся магнитное поле. Это поле пересекает подвижный диск и наводит в нем вихревые токи. Взаимодействие вращающегося магнитного поля с вихревыми токами диска создает вращающий момент, заставляющий диск вращаться в ту же сторону, в

которую вращается поле. Кроме того, в счетчике есть постоянный магнит, создающий противодействующий момент, в результате взаимодействия поля постоянного магнита с наводимыми им во вращающемся диске вихревыми токами. С помощью постоянного магнита устанавливается число оборотов счетчика.

Первый электромагнит имеет трехстержневой железный сердечник. На среднем стержне расположена катушка, состоящая из большого числа витков проводника малого сечения. Эта катушка, имеющая большое сопротивление, включается параллельно измеряемой цепи и называется обмоткой напряжения (аналогично ваттметру) (рис. 2.6.16).

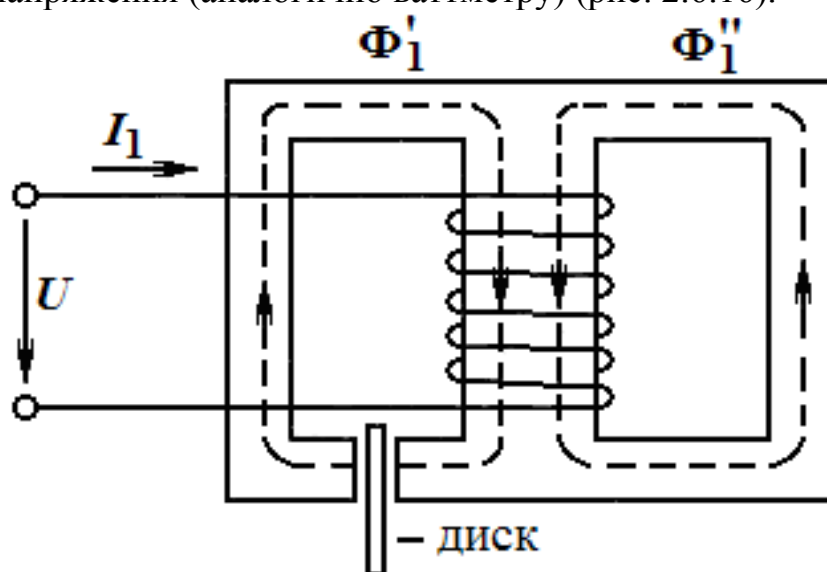


Рис. 2.6.16. Первый электромагнит счетчика

Под действием напряжения сети  $U$  в катушке напряжения течет ток  $I_1$ , создающий в сердечнике магнитный поток  $\Phi_1$ , который распадается на два потока:  $\Phi_1'$  и  $\Phi_1''$ . Поток  $\Phi_1'$  пересекает диск и является рабочим потоком. Поток  $\Phi_1''$  увеличивает индуктивность катушки напряжения за счет подмагничивания сердечника.

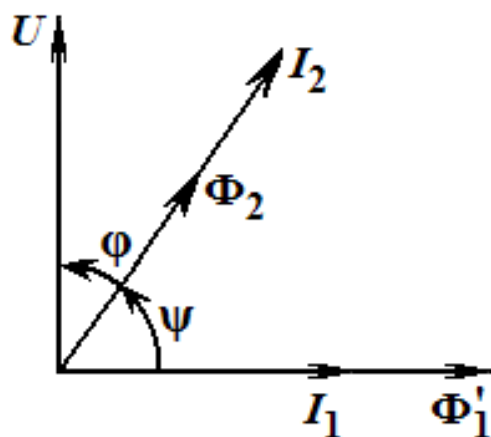


Рис. 2.6.17. Векторная диаграмма для первого электромагнита

Магнитный поток  $\Phi_1'$ , пронизывающий диск, совпадает по фазе с током  $I_1$  и отстает от приложенного напряжения  $U$  почти на  $90^\circ$  (ток  $I_1$  практически является индуктивным током, так как  $\omega L \gg R$  у обмотки) (рис. 2.6.17.).

Второй электромагнит имеет железный сердечник П-образной формы, на котором располагается катушка, состоящая из небольшого числа витков проводника большого сечения

(рис. 2.6.18). Эта катушка, имеющая малое сопротивление, включается последовательно с измеряемой цепью и называется токовой обмоткой (опять аналогично ваттметру). Ток  $I_2$ , протекающий через токовую катушку и являющийся током нагрузки, создает магнитный поток  $\Phi_2$ , пересекающий дважды диск.  $\Phi_2$  проходит значительное расстояние через воздух, совпадает с током  $I_2$  по фазе и отстает от напряжения сети  $U$  на угол  $\varphi$  (цепь  $RL$ ), значение которого зависит от проводников обмотки и нагрузки.

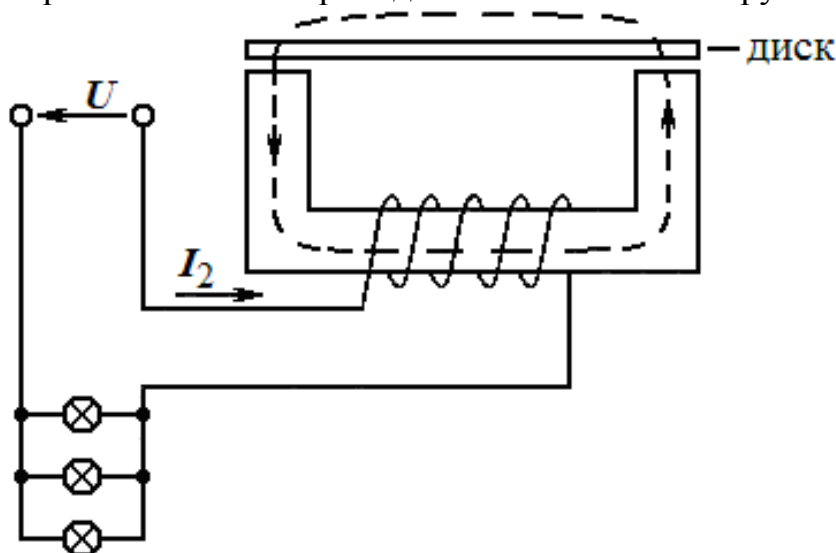


Рис. 2.6.18. Второй электромагнит счетчика

Вращающий момент диска, создаваемый магнитными потоками  $\Phi'_1$  и  $\Phi_2$ , пропорционален произведению амплитуд этих потоков и синусу угла  $\psi$  (угол сдвига фаз между потоками):

$$M_{\text{вр}} = C_1 \Phi'_{1m} \Phi_{2m} \sin \psi = C_1 \Phi'_{1m} \Phi_{2m} \sin(90 - \varphi) = C_1 \Phi'_{1m} \Phi_{2m} \cos \varphi,$$

где  $C_1$  – коэффициент, зависящий от частоты сети. Так как поток  $\Phi'_1$  пропорционален напряжению сети  $U$ , т.е.  $\Phi'_{1m} = C_2 U$ , а поток  $\Phi_2$  пропорционален току нагрузки  $I_2$ , т.е.  $\Phi_2 = C_3 I_2$ , то момент вращения

$$M_{\text{вр}} = C_1 C_2 C_3 U I \cos \varphi = C_4 P,$$

где  $P$  – активная мощность, потребляемая нагрузкой;

$$C_4 = C_1 C_2 C_3.$$

Как уже говорилось, поле постоянного магнита, пересекающее также диск, создает противодействующий момент  $M_{\text{пр}}$ , который пропорционален частоте вращения диска  $n_d$  (об/мин).

$$M_{\text{пр}} = C_5 n_d.$$

При вращении диска его вращающий и противодействующий моменты равны, т.е.  $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$  или  $C_4 P = C_5 n_d$ . Тогда частота вращения диска

$$n_d = \frac{C_4 P}{C_5}.$$

Если диск за время  $t$  сделал  $n$  оборотов, то

$$n = \int_0^t n_d dt = \frac{C_4}{C_5} \int_0^t P dt = \frac{C_4}{C_5} A,$$

где  $A = \int_0^t P dt$  – энергия, полученная потребителем за время  $t$ .

Электроэнергия определяется формулой

$$A = \frac{C_5}{C_4} n = cn,$$

где  $c = \frac{A}{n}$  – постоянная счетчика, представляющая собой электроэнергию, приходящуюся на один оборот диска.  $A$  выражается в киловаттах.

Счетчик имеет счетный механизм, связанный с осью диска, по показаниям которого определяют количество электроэнергии, которое израсходовал потребитель.

К достоинствам индукционных счетчиков следует отнести их большую надежность в работе, значительную перегрузочную способность по току. Так как в коэффициент  $c$  входит коэффициент  $c_1$ , зависящий от частоты сети, то индукционные счетчики пригодны только для переменного тока определенной частоты (например,  $f = 50$  Гц). К другому недостатку можно отнести зависимость показаний прибора от температуры.

### Контрольные вопросы

1. Какова структурная схема электропривода?
2. Каковы режимы работы электропривода?
3. Объясните основные элементы аппаратуры защиты и управления электродвигателем.
4. Объяснить схему управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.
5. Объяснить схему управления и реверса для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
6. Каково устройство индукционного счетчика электрической энергии?

### 3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

#### Общие сведения об электроснабжении

Система электроснабжения включает совокупность предприятий, связанных с выработкой и передачей, преобразованием и распределением, а также потреблением электрической энергии. Электроэнергия производится на *электростанциях*, которые обеспечивают преобразование различных видов энергии – топлива, падающей воды, ветра, солнечного света, атомной энергии и др. – с помощью электромашин (генераторов) в электрическую энергию.

Преобразование и распределение электроэнергии осуществляется на подстанциях. Затем она по линиям электропередачи (ЛЭП) разводится по территориям и районам, а далее преобразуется и распределяется по объектам. Электрические сети, в которые входят подстанции, распределительные установки, а также сами ЛЭП, делятся:

- по напряжению – на *сети низкого напряжения* (НН), или низковольтные (до 1 кВ), и *сети высокого напряжения* (ВН), или высоковольтные (свыше 1 кВ);
- по роду тока – на *сети постоянного* и *переменного напряжений*;
- по назначению – *городские* сети, *сети промышленных предприятий*, *сети электрического транспорта*, *сельские* сети, *районные* сети и др.;
- по конструктивному исполнению – *воздушные*, *кабельные* и *токопроводами*.

Для изображения электрических систем и сетей используются следующие условные графические обозначения (УГО) их элементов (рис. 3.1):

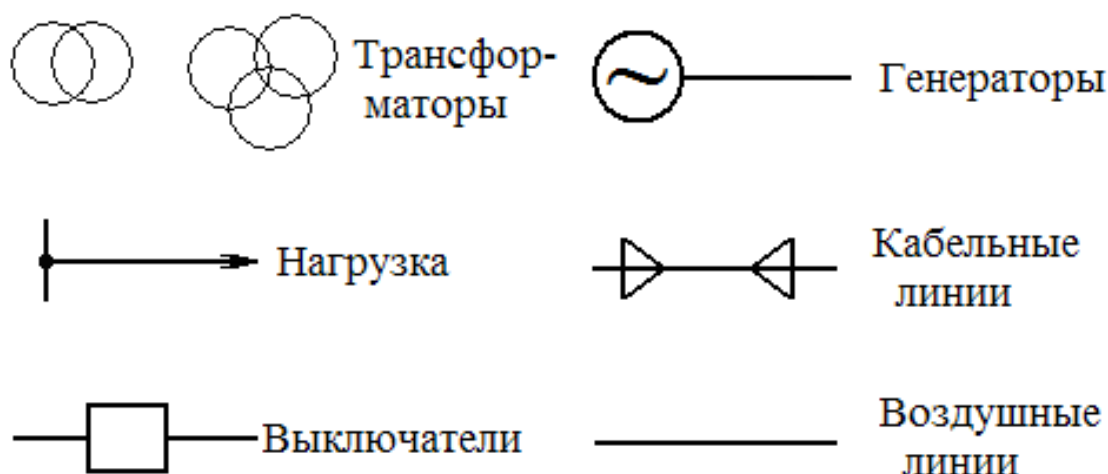


Рис. 3.1. Условные электрические изображения элементов электрических систем и сетей

Примерная схема простой электроэнергетической системы приведена на рис. 3.2. Здесь электрическая энергия, вырабатываемая на 2-х электростан-

циях различных типов: тепловой электростанции (ТЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), – подводится к потребителям, удаленным друг от друга. Для передачи электроэнергии на расстояние ее предварительно преобразовывают, повышая напряжение трансформаторами. У мест потребления электроэнергии напряжение понижают до нужной величины. Из схемы видно, что электрическая энергия передается по воздушным линиям.

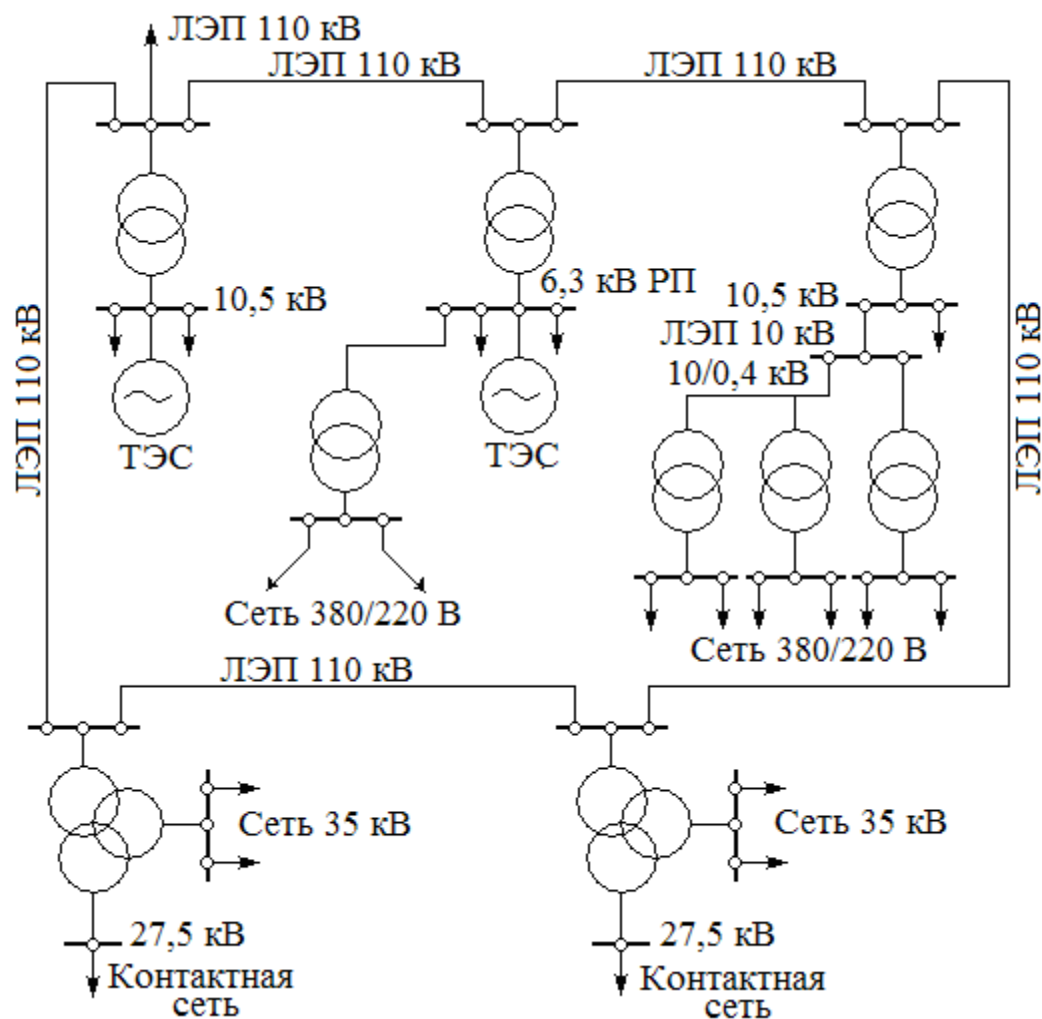


Рис. 3.2. Схема простой электроэнергетической системы

### Параметры и режимы систем и сетей электроснабжения

Следует различать параметры элементов системы и параметры ее режимов. Параметры элементов: сопротивления или проводимость, коэффициент трансформации, ЭДС источников, заданные токи (мощности) нагрузок. Параметры режима: частота, токи в ветвях, напряжения в узлах, фазовые углы, полная активная и реактивная мощности, а также несимметричность трехфазных цепей и несинусоидальность напряжений и токов.



### Режимы работы систем электроснабжения

*Нормальный установившийся режим:* значения основных параметров равны номинальным, а значения токов не превышают допустимых по условию нагревания проводов величин. Нагрузки меняются медленно, и регулирование работы происходит плавно.

#### Расчет и выбор сечений проводов

Расчет сечений проводов (кабелей) ведется по допустимой потере напряжения на проводе и по нагреванию провода током. Из двух сечений выбирают большее.

Относительная потеря напряжения в проводах определяется по формуле

$$\Delta U_* = \frac{\Delta U}{U} 100,$$

где  $\Delta U$  – потеря напряжения в проводах;

$U$  – напряжение, питающее провода.

Отсюда потеря напряжения в проводах:

$$\Delta U = \frac{\Delta U_* U}{100}.$$

Кроме того, потеря напряжения в проводах выражается формулой

$$\Delta U_* = \frac{2Il_p}{YS} 100,$$

где  $l$  – длина провода;

$Y$  – удельная проводимость материала провода (для меди

$$Y = 54 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2});$$

$S$  – сечение провода,  $\text{мм}^2$ ;

$I_p$  – рабочий ток нагрузки.

Тогда сечение провода определяется формулой

$$S = \frac{2Il_*}{Y\Delta U}. \quad (6.3.1)$$

#### Защита электрических линий и выбор плавких предохранителей

Элементы систем электроснабжения (генераторы, трансформаторы, ЛЭП и др.) в результате аварий могут выходить из строя и лишать часть потребителей электропитания. Для повышения их надежности применяются разнообразные устройства защиты. Основными причинами аварии являются пробой изоляции и короткое замыкание на землю. Для выявления причин и предотвращения аварий в электрических сетях разработаны

защитное заземление и защитное зануление объектов, а также защитное отключение электроустановок систем электроснабжения.

*Защитное заземление* предназначено для устранения опасности поражения электрическим током в случае прикосновения к корпусу и к другим нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением вследствие короткого замыкания на корпус или пробоя изоляции. При этом все нетоковедущие части элементов систем электроснабжения соединяются с землей с помощью проводников и заземлителя.

В четырехпроводных сетях нейтраль подключается к заземлителю непосредственно или через малые сопротивления  $R_3$  (рис. 3.3, а). Такие установки называются установками с *глухозаземленной нейтралью*. В них любое замыкание на землю является КЗ и сопровождается большим током, который отводится в землю, но способен вызвать перегрузку генератора. Для защиты генератора требуется на стороне источника энергии использовать систему защитного отключения. В случае прикосновения человека к голому фазному проводу он оказывается под фазным напряжением. Ток  $I_{\text{ч}}$  проходит через человека и его обувь в землю и далее через заземлитель нейтрали в сеть, причем он равен:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_3},$$

где  $R_{\text{ч}}$ ,  $R_{\text{об}}$  и  $R_3$  – сопротивления человека, обуви и заземлителя, соответственно.

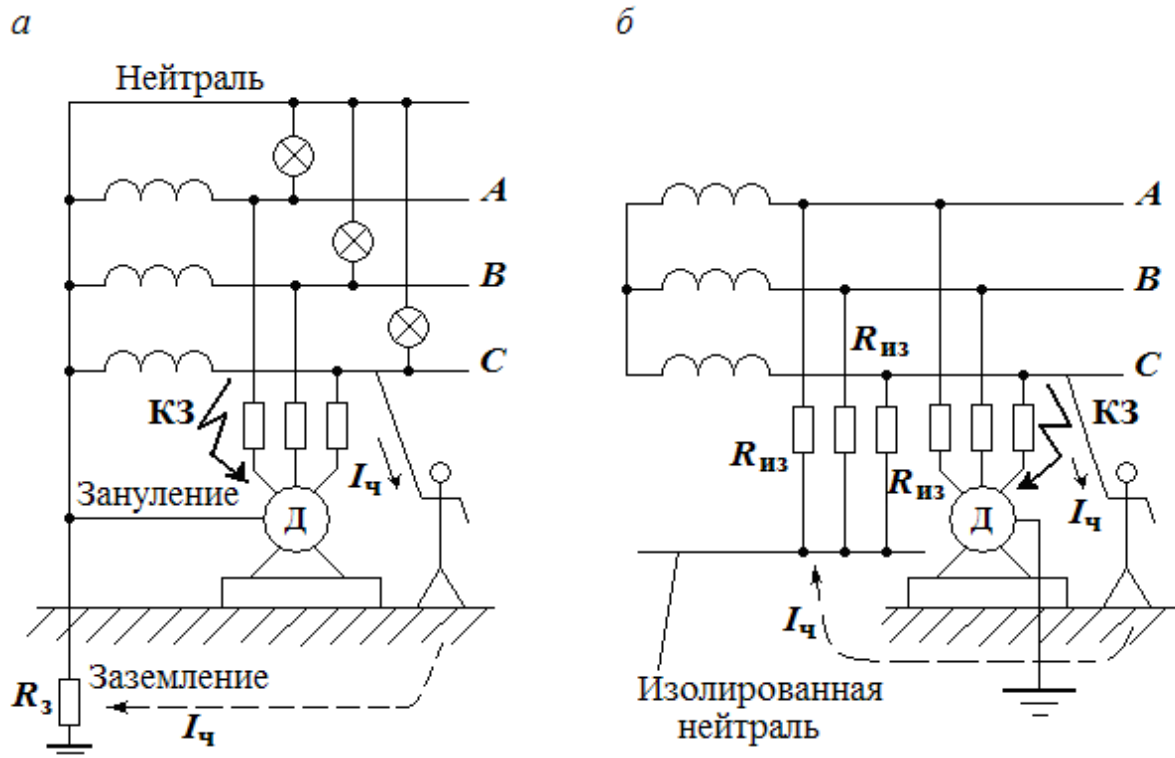


Рис. 3.3. Схемы подключения нейтрали к заземлителю:  
 а – непосредственно или через малые сопротивления;  
 б – с помощью создания изолированной нейтрали

При небольших напряжениях (220...380 В), хороших изоляционных свойствах обуви, а также высоком сопротивлении человека такой способ может обеспечить его защиту. Однако для достижения более высоких гарантий защиты требуется создание *изолированной нейтрали* (второй способ защиты оборудования и человека), или защитного зануления. Он применяется в установках с токами замыкания на землю не более 500 А. Осуществляется этот способ присоединением нейтрали к заземлителю через элементы с большим сопротивлением. Рассмотрим его на примере трехпроводной сети.

Если в такой сети образовать искусственную нейтраль и изолировать ее от заземлителя, то можно считать, что между ней и фазами также включены элементы с большими сопротивлениями  $R_{из}$  (рис. 3.3, б). В этой сети замыкание одной из фаз на землю не является коротким замыканием. Ток замыкания на землю в этом случае небольшой и не вызывает аварийного отключения линии. В случае прикосновения человека к голому фазному проводу ток проходит через тело, землю и далее через сопротивление изоляции в сеть. Он будет равен:

$$I_{ч} = \frac{U_{\phi}}{\frac{(R_{ч} + R_{из})}{3}},$$

где  $R_{из}$  – сопротивление изоляции нейтрали.

Выбор плавкой вставки предохранителя производится из условия, что номинальный ток плавкой вставки  $I_{вст}$  должен быть больше или равен рабочему току нагрузки  $I_p$ .

После выбора плавкой вставки следует проверить соответствие номинального тока плавкой вставки и допустимого тока  $I_{доп}$  для выбранного сечения провода. Необходимо, чтобы  $I_{доп} \geq K_o I_{вст}$ , где  $K_o$  – коэффициент соответствия защиты.

### Режим короткого замыкания в электрических сетях

Коротким замыканием (КЗ) называется непосредственное соединение любых 2-х точек разных фаз, фазы и нейтрали, нейтрали или фазы с землей, что не предусмотрено нормальными условиями работы установки. При возникновении КЗ резко уменьшается сопротивление цепи системы, сильно увеличиваются токи в ее ветвях, а напряжения на участках падают. Элементы сетей обладают активными, индуктивными и емкостными сопротивлениями (проводимостями):  $R, X_L, X_C (G, B_L, B_C)$ .

В случае появления КЗ в системе возникает переходный процесс с большими значениями напряжений и токов. Токи КЗ оказывают электродинамическое воздействие на электрооборудование, а при длительном

(более 0,1 с) действию они вызывают термический эффект, который приводит к значительному повышению температуры оборудования.

Для расчета токов КЗ в 3-фазной системе составляют эквивалентную схему цепи в режиме КЗ, задаются базисными условиями – мощностью и напряжениями, приводят все сопротивления к базисным условиям, определяют результирующие сопротивления ветвей от источника до точки КЗ и используют формулы

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}Z_{\text{рез}}}.$$

Для надежной работы электроустановки все ее элементы должны обладать динамической устойчивостью к воздействию механических усилий при протекании ударного тока КЗ. По закону Био-Савара, усилие между параллельными проводниками может быть определено по формуле

$$F_{\text{мех}} = 2,04 \frac{I_1 \cdot I_2}{d} 10^{-7} \text{ Н},$$

где  $I_i$  – токи в проводниках, А;

$d$  – расстояние между ними, м.

При одинаковом направлении токов усилие сближает проводники, а при разном – раздвигает их.

Рассматривая проводник как балку, получаем изгибающий момент от ударного тока:  $M = F_{\text{мех}} \cdot L$ , где  $L$  – длина проводника. Наибольшее механическое напряжение  $\sigma = \frac{M}{W}$ , где  $W$  – момент сопротивления.

Ток КЗ вызывает дополнительный нагрев элементов установки и повышение их температуры, которая не должна выходить за определенные пределы, чтобы не нарушить изоляцию. Допустимые температуры элементов при КЗ:

- медные шины – 300 °С;
- алюминиевые шины – 200 °С;
- кабели с бумажной пропитанной изоляцией до 10 кВ – 200 °С;
- то же от 20 до 220 кВ – 150 °С;
- кабели и изолированные провода – 150 °С.

Под действительным временем протекания тока КЗ понимают время действия защиты  $t_{\text{защ}}$  и время отключения выключателя  $t_{\text{ов}}$ :  $t_{\text{к}} = t_{\text{защ}} + t_{\text{ов}}$ . Мерой количества выделенной теплоты за время  $t_{\text{к}}$  является тепловой импульс:

$$B_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{к}}} I_{\text{к}}^2 dt.$$

## ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Строительную площадку освещает прожекторная установка, состоящая из шести прожекторов. Напряжение на установку подается от трехфазной сети по двухжильному медному кабелю длиной 85 м с полихлорвиниловой изоляцией. Определить сечение жилы кабеля, если каждый из прожекторов потребляет мощность  $P = 1$  кВт при напряжении  $U = 220$  В. Относительная допустимая потеря напряжения на кабеле  $\Delta U_* = 5\%$ .

*Решение*

Определяем потерю напряжения в кабеле

$$\Delta U = \frac{\Delta U_* \cdot U}{100} = \frac{5 \cdot 220}{100} = 11 \text{ В.}$$

Рабочий ток нагрузки находим по формуле

$$I_p = \frac{P}{U}.$$

Для установки из шести прожекторов рабочий ток нагрузки равен:

$$I_p = \frac{6P}{U} = \frac{6 \cdot 1000}{220} = 27,2 \text{ А.}$$

Определим сечение жилы кабеля, исходя из формулы (6.3.1):

$$S = \frac{2I_p}{\gamma \Delta U} = \frac{2 \cdot 85 \cdot 27,2}{54 \cdot 11} = 7,8 \text{ мм}^2.$$

По табл. 3.1 выбираем кабель, жилы которого имеют сечение 4 мм<sup>2</sup>, и допустимый ток 38 А, т.е. этот ток больше рабочего тока установки. Из двух сечений (4 и 7,8 мм<sup>2</sup>) выбираем большее ( $S = 7,8$  мм<sup>2</sup>), которому соответствует нормированное сечение  $S = 10$  мм<sup>2</sup> с допустимым током 70 А.

Т а б л и ц а 3 . 1

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Допустимые токовые нагрузки для кабелей с полихлорвиниловой (аналогичной) изоляцией	
	двухжильных, А	трехжильных, А
1,5	19	19
2,5	27	25
4	38	35
6	50	42
10	70	55
25	115	95
50	175	115

Выбранное сечение необходимо проверить на механическую прочность.

Для переносных электроустановок (табл. 3.2) по механической прочности минимальное сечение должно быть не менее  $2,5 \text{ мм}^2$ . Выбранное сечение  $S = 10 \text{ мм}^2$  удовлетворяет данному условию.

Т а б л и ц а 3 . 2

Наименование проводников	Минимальное сечение, $\text{мм}^2$
Изолированные провода внутри помещений	0,5
Кабели шланговые для передвижных электроустановок	2,5
Голые провода воздушных линий	6

2. Выбрать плавкую вставку предохранителя, исходя из условий предыдущей задачи.

*Решение.*

В нашем случае

$$I_{\text{вст}} \geq 27,2 \text{ А}.$$

По табл. 3.3 для защиты установки можно выбрать предохранитель типа ПР-2 с плавкой вставкой на номинальный ток  $I_{\text{вст}} = 35 \text{ А}$ .

Т а б л и ц а 3 . 3

Тип предохранителя	Номинальный ток патрона, А	Номинальный ток плавкой вставки, А
ПР-2	15	6, 10, 15
	60	15, 20, 25, 35, 45, 60
	160	60, 80, 100
	200	100, 125, 160, 200
ПНБ-2	40	15, 25, 40
	60	40, 60
	100	60, 80, 100
	150	100, 125, 150
	200	150, 200

Значение коэффициента  $K_0$  выбираем из табл. 3.4 и принимаем равным 1,25. Следовательно,

$$K_0 = 1,25 \cdot 35 = 43,75 \text{ А}.$$

Т а б л и ц а 3 . 4

Характеристика сети	$K_0$
Кабели с полихлорвиниловой (аналогичной) изоляцией	1,25
Кабели с бумажной изоляцией	1

Тогда

$$I_{\text{доп}} = 70 \text{ А} > 43,75 \text{ А},$$

т.е. условие соответствия выполняется.

### Краткая характеристика производственного электротравматизма

Анализ современного состояния производственного электротравматизма и рекомендации по его предупреждению основываются на изучении сведений о количестве и причинах несчастных случаев на производстве, поступающих ежегодно от предприятий.

По данным многочисленных исследований, производственный электротравматизм существенно зависит от характера производства и эффективности работы ЭРЦ предприятия. Это подтверждается данными электротравматизма, приведенными в табл. 3.5.

Наибольший электротравматизм наблюдается в электроэнергетике, поскольку большинство работников этой отрасли непосредственно занято обслуживанием электроустановок. Обеспечение электробезопасности в химической, угольной и некоторых других отраслях промышленности, а также в строительстве неамного лучше.

Т а б л и ц а 3 . 5

Отрасль производственной деятельности	Количество электротравм на 1 млн рабочих	Доля электротравм в совокупности несчастных случаев, %
Электроэнергетика	6,4	29
Строительство, промышленность строительных материалов	2,4	11,3
Химическая, нефтехимическая и газовая промышленность	2,1	13,7
Геологоразведка	1,9	6
Металлургическая промышленность	1,6	9,5
Угольная промышленность	1,6	5
Пищевая промышленность	1,4	13
Предприятия связи, автотранспорта и шоссейные дороги	1,4	23
Железнодорожный транспорт, транспортное строительство	1,5	13
Сельское хозяйство	1,25	9,3
Местная промышленность и коммунально-бытовые предприятия	1,25	12,8
Электротехническая промышленность	1,25	14
Машиностроение и судостроение	1,1	10
Морской и речной флот	1,1	5
Лесная, целлюлозно-бумажная, деревообрабатывающая и торфяная промышленность	0,75	2
Текстильная и легкая промышленность	0,6	17
Торговля	0,5	15
Гражданская авиация	0,25	4
Культурно-просветительные, медицинские и научные учреждения, учебные заведения	0,4	21,3

Распределение случаев производственного электротравматизма по видам электроустановок приведено в табл. 3.6.

Т а б л и ц а 3 . 6

Вид электроустановки	Электротравматизм, %	Вид электроустановки	Электротравматизм, %
ВЛ (всего)	33,4	Машины электрофицированные (всего)	14,8
Из них:		Из них:	
линии электропередач	28,6	передвижные	12
контактные сети	2,9	переносные и ручные	2,8
линии связи	1,9	Установки сварочные (всего)	5,8
ТП и РУ (всего)	22,7	Из них ручные дуговые	5,3
Из них:		Установки нагревательные	3,3
КТП и КРУ	8,3	Светильники (всего)	4
ЗРУ	7,6	Из них стационарные	2,5
Щиты, шкафы	4,5	Электроподъемники	3,9
		Прочие	12,1

П р и м е ч а н и е . ТП – трансформаторная подстанция; РУ – распределительное устройство; КТП – комплексная трансформаторная подстанция; КРУ – комплексное распределительное устройство; ВЛ – воздушные линии.

Из анализа данных (см. табл. 3.6) следует, что больше половины всех несчастных случаев приходится на воздушные линии (ВЛ), трансформаторные подстанции (ТП) и распределительные устройства (РУ). Из них 75 % происходит при напряжении 6 и 10 кВ. Наибольшую опасность представляют ВЛ, расположенные на территории предприятий истроек. Примерно 60 % травм на линиях электропередачи обусловлено соприкосновением с ними автокранов, буровых вышек, лестниц и других крупногабаритных объектов, т.е. фактически не связано с обслуживанием линий.

Случаи поражения шаговым напряжением характерны под контактными сетями (в 8 раз выше среднего уровня). Из установок напряжением 380 и 220 В наиболее опасны передвижные машины с электроприводом – насосы, транспортеры-погрузчики, бетономешалки, электрифицированные экскаваторы и др. От 43 до 77 % несчастных случаев на передвижных установках и на ручных электрифицированных машинах происходит вследствие появления напряжения на корпусе машины, но в среднем по всем установкам этой причиной обусловлено лишь 13 % травм.

О большой опасности электросварочных установок, а также передвижных машин с электроприводом и электрифицированных агрегатов можно судить и по приведенному ниже соотношению частоты электротравм в



относительных единицах на некоторых установках, применяемых в промышленности.

Электродвигатели	1
Трансформаторы силовые	26
Электронасосы	22
Установки электросварочные:	
ручные	180
контактные	50
Машины зерноочистительные и зерносушильные	150
Электрокраны	5
Бетономешалки	4
Комбайны угольные, горнопроходные, завалочные	680
Буровые установки (только касание ВЛ)	50
Автомобильные краны (только касание ВЛ)	22

Статистика электротравматизма показывает, что чем моложе работники, тем выше у них частота электротравматизма (рис. 3.4). Каждую третью травму получают работники моложе 20 лет при работе на оборудовании с электроприводом, каждую четвертую – при обслуживании воздушных линий, каждую шестую – при выполнении операций на электропроводах и светильниках, а также в трансформаторной подстанции, при работе с распределительным устройством, распределительными шкафами и щитами (работники в возрасте 50 лет и старше – примерно 9 % электротравм).



Рис. 3.4. График частоты электротравм в зависимости от возраста электриков

Максимум травм приходится на электриков со стажем свыше 10 лет (рис. 3.5) и с IV квалификационной группой по технике безопасности (рис. 3.6).

Высокий травматизм у квалифицированных опытных работников объясняется тем, что им приходится выполнять основной объем электроопасных работ, и, следовательно, вероятность попадания под напряжение у них больше, чем у работников с малым опытом. Это свидетельствует о необходимости строжайшего соблюдения требований безопасности при обслуживании, ремонте и испытаниях электроустановок и электрических сетей промышленных предприятий.

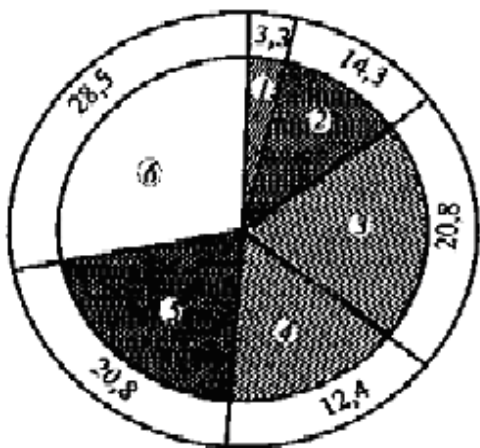


Рис. 3.5. Производственный электротравматизм у работников с различным стажем, %:  
1 – до 1 мес.; 2 – свыше 1 мес. до 1 года; 3 – свыше 1 года до 3-х лет; 4 – свыше 3 лет до 5; 5 – свыше 5 лет до 10 лет; 6 – свыше 10 лет

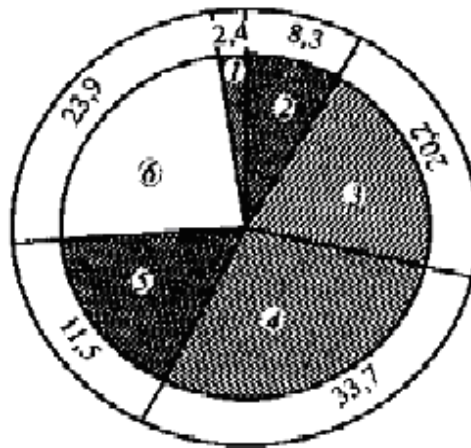


Рис. 3.6. Производственный электротравматизм у электротехнического персонала с различными группами по ТБ, %:  
1–5 – соответственно I–V группы; 6 – группа не присвоена

### Виды электротравм

В процессе выполнения работ по обслуживанию, ремонту, испытаниям электроустановок и электросетей промышленных предприятий возникает вероятность попадания человека под напряжение, т.е. прикосновения к точке, потенциал которой отличается от потенциала земли, или к двум точкам электроустановки с различными потенциалами. Так как работы на электрических сетях и электрифицированном оборудовании выполняются рабочими не только электротехнических, но и других профессий, вопросы электробезопасности труда становятся весьма актуальными. Опасное и вредное воздействие на обслуживающий персонал электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

До момента соприкосновения с частями конструкций, находящихся под напряжением, электрический ток не воздействует на органы чувств. При соприкосновении электрический ток, протекая через тело человека, может оказать термическое, электрическое или биологическое воздействие на организм. Первое действие характеризуется нагреванием тканей, вплоть до ожогов, второе – разложением жидкостей и крови в организме человека, а третье – сопровождается разрушением и возбуждением тканей и сокращением мышц.

Различают три вида электротравм:

- 1) местные, при которых появляются местные ожоги, повреждения;
- 2) общие, когда поражаются жизненно важные органы человека (такой вид поражения называют электрическим ударом);
- 3) смешанные.

*Местные* электротравмы характеризуются такими поражениями, как металлизация кожи, появление электрических знаков, механические повреждения и электроофтальмия (воспаление наружных оболочек глаз в результате воздействия ультрафиолетовых лучей от дуговой электросварки).

*Общие* электротравмы представляют собой результат электрического удара, возбуждающего живые ткани до состояния судорожных сокращений.

Виды общих электротравм:

- не вызывающие сокращения мышц без потери сознания;
- приводящие к судорожному сокращению мышц с потерей сознания, но при работающих сердце и системе дыхания;
- с потерей сознания и нарушением сердечной деятельности и дыхания;
- электрические удары, вызывающие клиническую смерть пострадавшего.

Под клинической смертью понимают переходное состояние пострадавшего от жизни к смерти. Состояние клинической смерти длится 6...7 мин. Если за это время пострадавшему не удалось оказать помощь, которая привела бы его в жизнеспособное состояние, то наступают необратимые процессы. Причинами смерти являются: прекращение дыхания, остановка сердца, электрический шок.

#### Факторы, влияющие на исход поражения человека током

Основными факторами, влияющими на степень поражения электрическим током, являются: путь тока в теле человека (рис. 3.7), сила тока, вид тока (постоянный или переменный), а также время его прохождения. Наиболее опасными направлениями прохождения тока считают «голова – руки», «голова – ноги», наиболее распространенные случаи – петли «рука – нога» (рис. 3.8) «рука – рука» (рис. 3.9), так как при этом ток поражает органы сердца и дыхания.

Силу электрического тока, проходящего через тело человека, можно определить по закону Ома как отношение приложенного напряжения к сопротивлению тела человека. Сопротивление тела человека существенно зависит от состояния поверхности кожи в месте соприкосновения, общего физиологического и психологического состояния организма и др. Оно может изменяться от нескольких сотен до десятков тысяч Ом. Если кожа потная, смочена эмульсией или другими растворами, засорена токопроводящей пылью, то сопротивление резко снижается. Наиболее опасен ток промышленной частоты (50 Гц). Токи высокой частоты обычно не вызывают электрического шока, но при длительном воздействии могут привести к ожогу отдельных частей или их перегреву.

Раздражающее действие переменного тока промышленной частоты человек начинает ощущать при токе 1,0...1,5 мА и постоянном токе 5...7 мА. Эти токи называют *пороговыми* *ощутимыми*. Серьезной опасности для человека они не представляют – человек может самостоятельно отделиться

от цепи. Если переменный ток достигает 5...10 мА, то его раздражающее действие становится более ощутимым. Появляется боль в мышцах, которая может привести к судорогам. При переменных токах 10...15 мА и постоянных токах 50...80 мА боль и судороги мышц рук и ног становятся такими сильными, что человек не в состоянии разжать руку, отбросить от себя провод, отойти от места поражения. Эти токи называют *пороговыми неотпускающими*. При переменном токе промышленной частоты величиной 25 мА и выше происходит судорожное сокращение мышц не только рук и ног, но и грудной клетки.

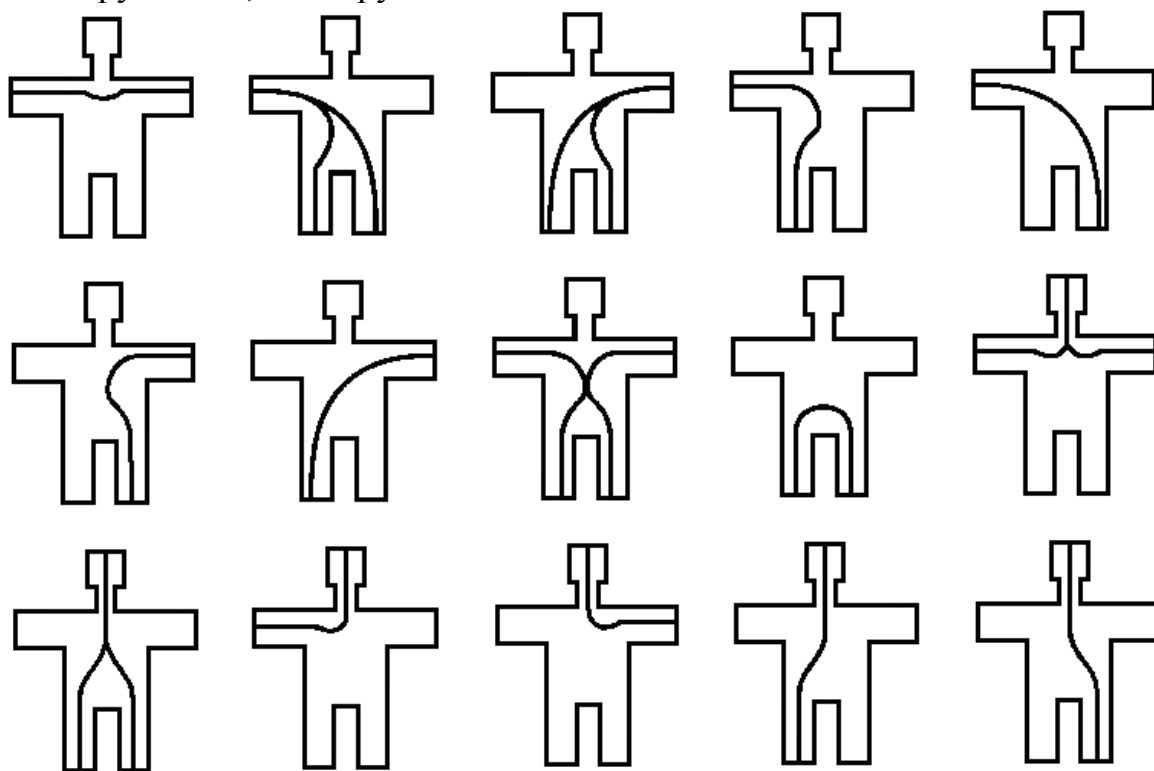


Рис. 3.7. Путь тока в человеке при поражении током

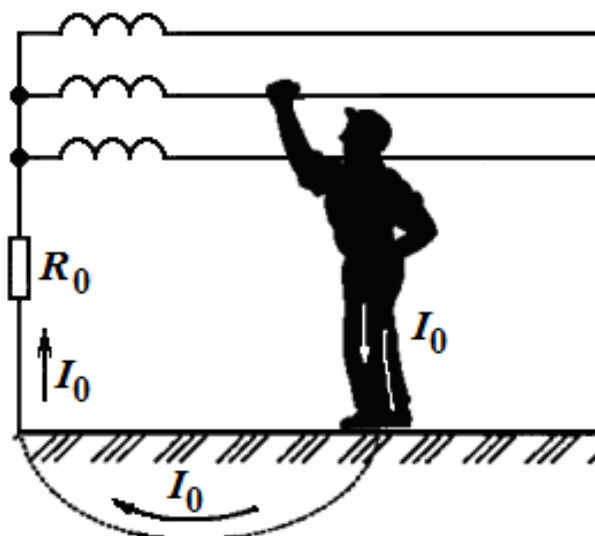


Рис. 3.8. Прикосновение человека к одной фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью

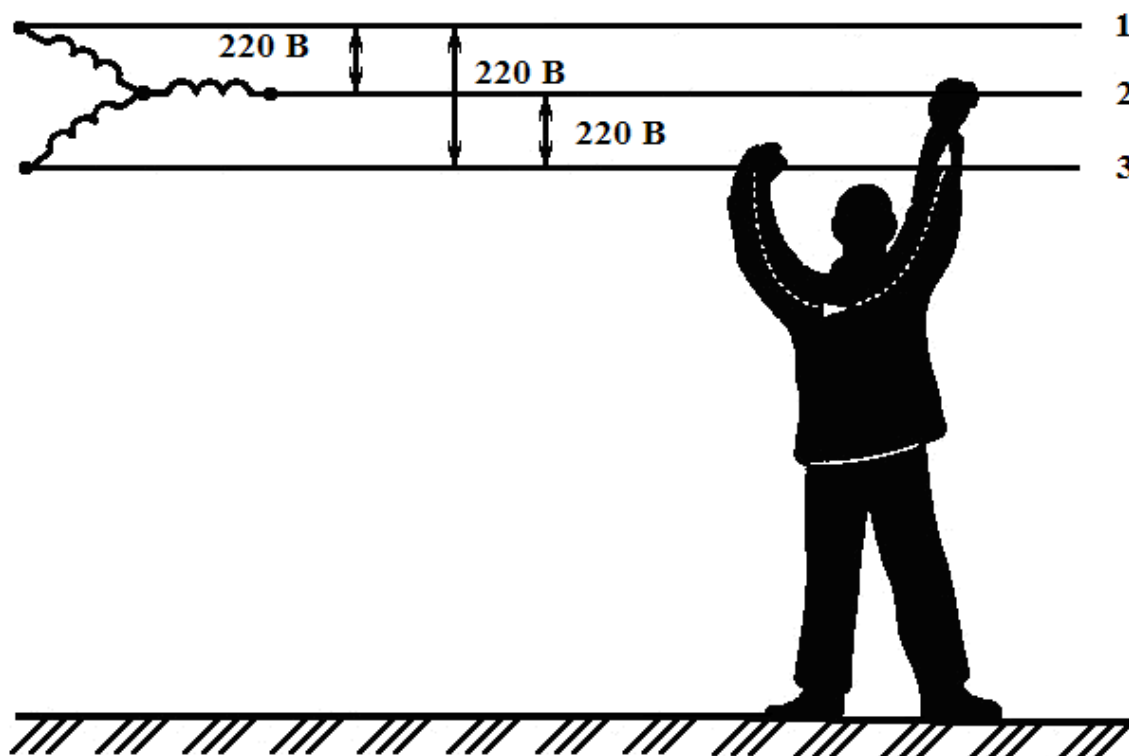


Рис. 3.9. Прикосновение человека к двум проводам трёхфазной сети с линейным напряжением 220 В с изолированной нейтралью:  
1, 2, 3 – фазные провода

При токе 50 мА частотой 50 Гц работа органов дыхания очень затрудняется, а при токе 100 мА и выше и при постоянном токе 300 мА за время 1...2 с поражается сердце. Это проявляется в его *фибрилляции*. Токи эти называют фибрилляционными. При фибрилляции сердце как орган перекачки крови не выполняет свои функции, в организм поступает недостаточное количество кислорода, что приводит к острому кислородному голоданию, сопровождающемуся остановкой дыхания и наступлением клинической смерти, которая переходит в биологическую, если пострадавшему не оказана своевременно первая помощь.

Длительность воздействия тока на человека является очень важным фактором, влияющим на исход поражения.

При расчетах учитывают, что сопротивление тела человека зависит от пола и возраста людей: у женщин это сопротивление меньше, чем у мужчин, у детей – меньше, чем у взрослых, у молодых людей – меньше, чем у пожилых. Объясняется это толщиной и степенью огрубения верхнего слоя кожи.

Кратковременное (на несколько минут) снижение сопротивления тела человека (на 20...50 %) вызывают внешние, неожиданно возникающие физические раздражения: болевые (удары, уколы), световые и звуковые. Так как сопротивление тела человека электрическому току нелинейно и нестабильно и вести расчеты с такими сопротивлениями сложно, принято условно считать, что сопротивление тела человека стабильно, линейно, активно и составляет 1000 Ом.

## Классификация производственных помещений и причин электротравматизма

Безопасность работ в электротехнических установках зависит от влажности помещения, его температуры, содержания токопроводящей среды (массы металлов, раствора кислот и солей) и т.д. Поэтому, например, при работе в резервуарах, где имеются большие поверхности хорошо проводящего металла, допустимое по условиям безопасности напряжение переносных ламп принято равным 12 В. В иных случаях, оговариваемых обычно правилами эксплуатации, допускается напряжение 42 В.

При сооружении электротехнических установок всегда учитываются окружающие условия и предусматриваются мероприятия, снижающие возможность поражения электрическим током при эксплуатации электроустановок.

Среда производственных и бытовых помещений (табл. 3.7), в которых находятся электрические сети и оборудование, может разрушительно действовать на изоляцию, чем увеличивает опасность поражения человека электрическим током. По степени опасности поражения электрическим током помещения могут быть без повышенной опасности, с повышенной опасностью и особо опасные.

Т а б л и ц а 3 . 7

Класс помещения	Среда	Характеристики среды
1	2	3
Без повышенной опасности	Нормальная	Сухой воздух, отсутствуют признаки, свойственные жарким, пыльным, химически и биологически активным средам. Относительная влажность воздуха не превышает 60 %
С повышенной опасностью	Сырая	Относительная влажность воздуха длительное время превышает 75 %
	Жаркая	Температура воздуха длительное время превышает плюс 35 °С
	Пыльная	По условиям производства в воздух выделяется технологическая пыль в таком количестве, что может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т.д. Пыль подразделяется на проводящую и не- проводящую
Особо опасные	Химически активная и биологическая	По условиям производства в воздухе содержатся (постоянно и длительно) пары или образуются отложения, действующие разрушающе на изоляцию и токоведущие части электрооборудования
	Особо сырая	Относительная влажность близка к 100 % (потолок, стены, пол и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой)

К помещениям *без повышенной опасности* относятся: сухие помещения с токонепроводящими полами, токонепроводящей пылью, нежаркие, с температурой воздуха не выше 4...35 °С; помещения, где невозможно

одновременное прикосновение к металлическим конструкциям зданий, машин, аппаратов и т.д., имеющим хорошее соединение с землей, с одной стороны, и к корпусам электрооборудования – с другой.

К классу помещений с повышенной опасностью относятся: сырые помещения с токопроводящими полами, токопроводящей пылью, с температурой воздуха, длительно превышающей +35 °С; помещения, где возможно одновременное прикосновение к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам и механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам или конструкциям электрооборудования, с другой.

К особо опасным помещениям относятся особо сырые помещения с химически активной и биологической средой, в которых по условиям производства постоянно или длительно содержатся пары или образуются отложения, действующие разрушительно на изоляцию токоведущих частей электрооборудования.

К токопроводящим полам относятся деревянные, сырые торцовые и грязные; металлические плиты, бетонные и железобетонные сырые. К непроводящим – деревянные торцовые сухие чистые полы и др.

Существенным фактором, влияющим на безопасность труда, является использование в электроустановках и электрических сетях материалов, стойких к действию кислот, газов, щелочей (табл. 3.8).

Т а б л и ц а 3 . 8

Материал	Кислота									Хлор	Щелочь	Ам-миак
	соляная		азотная		серная		плавиковая	уксусная				
	5%-я	50%-я	5%-я	50%-я	5%-я	50%-я		5%-я	50%-я			
Медь	С	Н	Н	Н	С	Н	Н	Д	Д	Н	Д	Н
Алюминий	Н	Н	С	Н	Н	Н	Н	С	Н	С	Н	Н
Свинец	Д	Д	Н	Н	П	П	Н	С	С	С	С	Д
Олово	Д	С	С	М	Д	С	Н	П	П	П	С	П
Никель	Д	С	Н	Н	Д	Д	П	М	Н	Д	П	С
Бронза	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	М	Н	Н	П	Н
Латунь	М	Н	М	Н	Д	Н	Н	Д	С	С	Д	П
Железо	Н	Н	Н	Н	И	Н	Н	Н	Н	С	С	С
Хлобчато-бумажная ткань	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Д	Н	М	С	П
Фарфор	П	П	П	П	П	П	Н	П	П	С	П	П
Вулканизированная резина	С	С	М	С	С	М	Н	С	С	Н	П	П

Примечание. Н – неустойчивость; М – малая устойчивость; С – средняя устойчивость; Д – достаточная устойчивость; П – полная устойчивость.

Причины, влияющие на электротравматизм, подразделяют на технические, организационно-технические, организационные и организационно-социальные.

Наиболее распространенными *техническими* причинами электротравм являются: дефекты устройства электроустановок и защитных средств (брак при их изготовлении, монтаже и ремонте); неисправности электроустановок и защитных средств, возникшие в процессе эксплуатации; несоответствие типа электроустановки и защитных средств условиям применения; использование электроустановок, не принятых в эксплуатацию; применение защитных средств с истекшим сроком периодических испытаний.

К *организационно-техническим* относят: ошибки в производстве отключений электроустановки (отключение другой установки, отключение не со всех сторон и т.д.); ошибочную подачу напряжения на электроустановку, где работают люди; отсутствие ограждений и предупредительных плакатов у места работы; допуск к работе на отключенные токоведущие части без проверки отсутствия напряжения на них; нарушение порядка наложения, снятия и учета переносных заземлений; несвоевременную замену неисправного или устаревшего оборудования и др.

К *организационным* причинам относят: несоблюдение или неправильное выполнение организационных мероприятий безопасности; недостаточную обученность электротехнического и неэлектротехнического персонала; неправильное оформление работы; несоответствие работы заданию; нарушение порядка допуска бригады к работе; некачественный надзор во время работы и др.

*Организационно-социальные причины*: допуск к работе с электроустановками лиц моложе 18 лет; привлечение к работе лиц, не оформленных приказом о приеме на работу в организацию; несоответствие выполняемой работы специальности; выполнение работы в сверхурочное время; нарушение производственной дисциплины; игнорирование правил техники безопасности квалифицированным персоналом.

Анализ статистики электротравм показывает, что попадание людей под напряжение происходит по следующим причинам: прикосновение к открытым токоведущим частям, находящимся под напряжением, – 56 %; прикосновение к металлическим частям оборудования, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции, – 22 %; прикосновение к неметаллическим предметам и частям оборудования, оказавшимся под напряжением (прикосновение к токоведущим частям, покрытым изоляцией, потерявшей свои изоляционные свойства; касание токоведущих частей предметами с низким сопротивлением), – 17 %; соприкосновение с полом, стенами и конструктивными деталями помещений, оказавшимися под напряжением вследствие повреждения изоляции, поражение напряжением – 3 % и поражение через электрическую дугу – 2 %.



### Контрольные вопросы

1. Какие виды электротравм и профессиональные заболевания от опасных и вредных действий электрического тока, электрической дуги и электрических полей Вы знаете?
2. Какие факторы влияют на степень поражения человека электрическим током?
3. Как влияет на электротравматизм среда производственных помещений?
4. Какие причины приводят к летальному исходу при поражении человека электрическим током?
5. Какова схема простой электроэнергетической системы?
6. Каковы параметры и режимы систем и сетей электроснабжения?
7. Какова защита электрических цепей?
8. Что такое режим короткого замыкания в электрических цепях?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электротехника и электроника – области, которые развиваются опережающими по сравнению с другими отраслями науки и техники темпами. Это ведет к быстрому устареванию любых учебников. Однако освоение основных понятий, принципов и методов анализа, приведенных в книге, представление о возможностях и областях применения простейших электротехнических и электронных устройств позволит читателю перейти к изучению более сложных вопросов, изложенных в специальной литературе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немцов, М.В. Электротехника и электроника [Текст]: учебник / М.В. Немцов. – М.: Изд-во МЭИ, 2006.
2. Петленко, Б.И. Электротехника и электроника [Текст]: учебник / Б.И. Петленко [и др.]. – М.: И. Ц. Академия, 2006.
3. Нохрин, А.Н. Электротехника и электроника. Ч.2. Электроника [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Нохрин, А.К. Кудрявцева. – Череповец: Изд-во ГОУ ВПО ЧПУ, 2007.
4. Пинт, Э.М. Резисторный усилитель напряжения: теоретические сведения, расчет и применение [Текст]: моногр. / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2012.
5. Пинт Э.М. Основы теории, расчета линейных электрических цепей и электроснабжения объектов [Текст]: учеб. пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2012.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ .....	8
1.1. Электрические цепи постоянного тока.....	8
1.2. Линейные однофазные электрические цепи переменного тока.....	31
1.3. Трехфазные цепи синусоидального тока.....	52
2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ .....	65
2.1. Электроизмерительные приборы и электрические измерения .....	65
2.2. Электромагнитные устройства и трансформаторы .....	76
2.3. Электрические машины постоянного тока.....	97
2.4. Асинхронные электрические машины.....	106
2.5. Синхронные электрические машины .....	123
2.6. Электропривод.....	126
3. Электроснабжение объектов .....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	162
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	163

Учебное издание

Пинт Эдуард Михайлович  
Петровнина Ирина Николаевна  
Романенко Игорь Иванович  
Еличев Константин Александрович

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА  
Часть II. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебник

В авторской редакции  
Верстка Н.В. Кучина

---

Подписано в печать 14.07.2016. Формат 60х84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 9,53. Уч.-изд.л. 10,25. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.  
Заказ № 464.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.

