

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

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

# **ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Рекомендовано Редсоветом университета  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки  
08.03.01 «Строительство»

Пенза 2015

УДК 621.537  
ББК 312  
Э45

Рецензенты: доктор технических наук, профессор  
А.И. Сидоров (ПГУ);  
кандидат технических наук, доцент  
А.Б. Терентьев (ПГТУ)

**Электроснабжение с основами электротехники: учеб. пособие** / Э.М. Пинт, Г.В. Фролов, И.Н. Петровнина, И.И. Романенко. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 92 с.

Излагается теоретический материал по курсу «Электроснабжение с основами электротехники». Даются элементы расчета электротехнических устройств и систем электроснабжения. Приводятся тесты для самоконтроля. Пособие содержит материалы, предназначенные для фонда оценочных средств.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Механизация и автоматизация производства» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению 08.03.01 «Строительство», при изучении дисциплины «Электроснабжение с основами электротехники». Пособие может быть использовано студентами других специальностей, изучающими курсы «Общая электротехника и электроника», «Электротехника и электроника», «Теоретические основы электротехники».

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2015

© Пинт Э.М., Г.В. Фролов, Петровнина И.Н.,  
Романенко И.И., 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью учебного пособия «Электроснабжение с основами электротехники» является формирование у студентов знаний о принципах действия, областях применения основных электротехнических устройств и систем электроснабжения.

Теоретическая основа курса по каждому разделу подкрепляется практической частью, в которой даются элементы расчета электротехнических устройств и систем электроснабжения.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой дисциплины «Электроснабжение с основами электротехники», изучаемой студентами второго курса направления подготовки «Строительство».

Учебное пособие содержит шесть разделов: «Электромагнитные устройства и трансформаторы», «Электрические машины постоянного тока», «Асинхронные электрические машины», и «Синхронные электрические машины», «Электропривод и счетчик электрической энергии», «Электроснабжение объектов».

Первый и второй раздел подготовлены к.т.н, доцентом Г.В. Фроловым, третий раздел – к.т.н, доцентом И.Н. Петровниной, четвертый и пятый раздел – к.т.н, профессором Э.М. Пинтом, шестой раздел – к.т.н, доцентом И.И. Романенко.

Усвоение курса «Электроснабжение с основами электротехники» способствует формированию некоторых общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, предусмотренных Федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки «Строительство»:

ПК-9 – знание нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования сооружений, инженерных систем и оборудования, планировки и застройки населенных мест;

ПК-10 – владение методами проведения инженерных изысканий, технологией проектирования деталей и конструкций в соответствии с

техническим заданием с использованием стандартных прикладных расчетных и графических программных пакетов;

ПК-11 – способность проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных расчетов, разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы, контролировать соответствие разрабатываемых проектов и технической документации заданию на проектирование, стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам );

ПК-17 – знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности;

ПК-19 – выработка навыков составления отчетов по выполненным работам, участия во внедрении результатов исследований практических разработок;

ПК-20 – знание правил и технологий монтажа, наладки, испытаний и сдачи в эксплуатацию конструкций, инженерных систем и оборудования строительных объектов, образцов продукции, выпускаемых предприятием;

ПК-21 – владение методами опытной проверки оборудования и средств технологического обеспечения;

ПК-22 – владение методами оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных объектов, оборудования.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

✓ **знать:**

– основные физические явления, фундаментальные понятия и законы современной физики;

– основы электроснабжения и электротехники;

✓ **уметь:**

– применять современные математические методы в прикладных задачах профессиональной деятельности;

– диагностировать состояние инженерных систем и сетей;

✓ **владеть:**

– методологией проведения исследований электротехнических устройств и систем электроснабжения;

– методикой расчета электрических сетей.

Знания, полученные студентами, могут быть использованы при выполнении выпускной квалификационной работы и в дальнейшей профессиональной деятельности.

## ВВЕДЕНИЕ

Любое строительство новых объектов начинается с возведения на строительной площадке подстанции, которая связана с электростанцией высоковольтной линией передачи электрической энергии. Основным элементом подстанции является понижающий трансформатор, питающий строительные машины необходимыми напряжением и током. В возводимых жилых домах и производственных помещениях прокладываются электрические сети и объекты оснащаются определенным электрооборудованием.

В связи с вышесказанным дисциплина «Электроснабжение с основами электротехники» является важным звеном в системе подготовки бакалавров направления «Строительство». Эта дисциплина дает студентам нужные теоретические знания по электроснабжению и основам электротехники, 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 вышеназванной дисциплине рассматриваются методы расчета или элементы расчета цепей и устройств.

Предлагаемое учебное пособие содержит материал курса «Электроснабжение с основами электротехники» по широко используемым в строительной индустрии различным электротехническим устройствам. Данный материал изучается студентами – будущими бакалаврами после усвоения построения, свойств, принципа действия электрических цепей.

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

# 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ТРАНСФОРМАТОРЫ

## Электромагнитные реле, контакторы, магнитные пускатели

Электромагнитные устройства (ЭМУ) предназначены для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии в механическую энергию (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. 1.1 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.

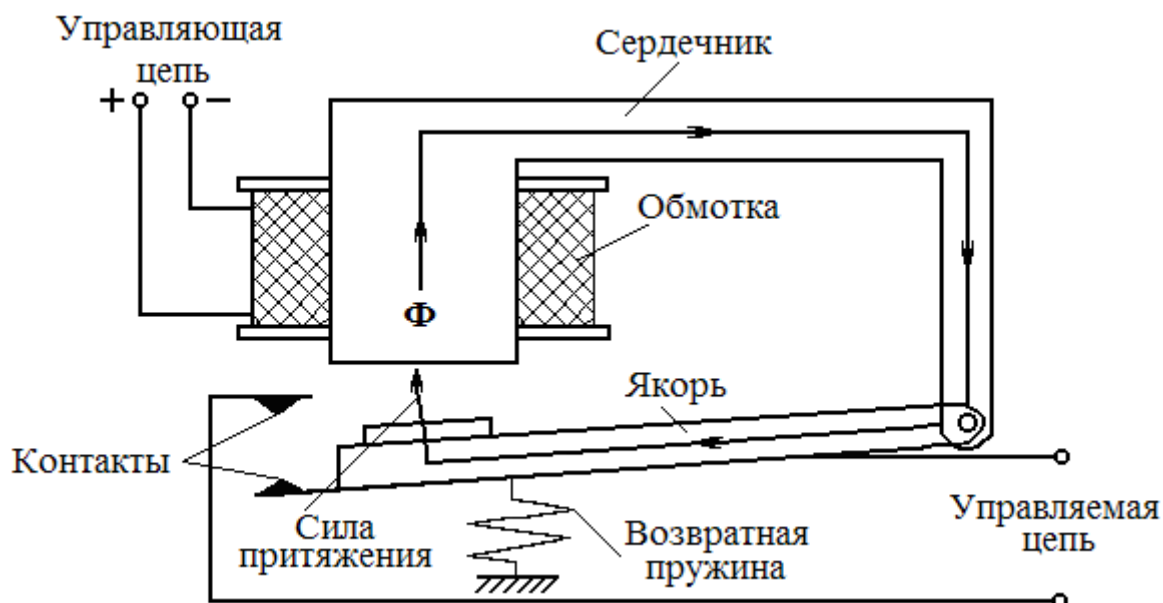


Рис. 1.1. Упрощенная схема реле постоянного тока

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  $P_y$  в цепи управления, при которой оно срабатывает. У высокочувствительных реле  $P_y < 10$  мВт, реле нормальной чувствительности срабатывает при  $P_y = 1-5$  Вт, реле низкой чувствительности – при  $P_y = 10-20$  Вт. Мощность  $P_k$  в цепи, которую коммутируют контакты реле, значительно превышает  $P_y$ . Отношение этих мощностей называют коэффициентом усиления

(управления) реле:  $K_y = \frac{P_y}{P_k}$ . Значение  $K_y$  у высокочувствительных реле

достигает нескольких 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, еще 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. Магнитное поле способно оказывать силовое и индукционное воздействия. В первом случае оно выталкивает проводники с током, а во втором – вызывает появление ЭДС на концах проводника без тока при его движении 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):

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

Направление электромагнитной силы  $F$  от проводника с током определяется по *правилу левой руки* (рис. 1.2, а). Силовое (электромеханическое) действие МП используется для создания электродвигателей, подъемных электромагнитов, реле и т.п. устройств. На рис. 1.2, б показан принцип действия электродвигателя постоянного тока. Основными частями двигателя являются: неподвижная часть – *статор* и вращающаяся часть – *ротор*.

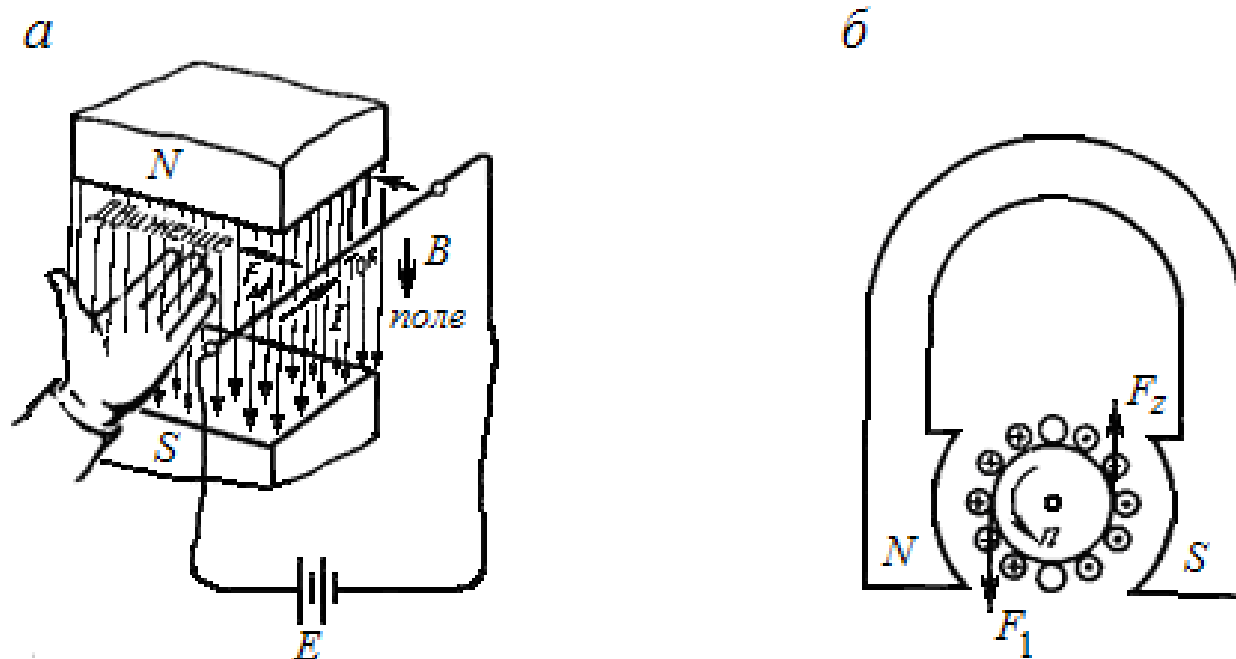


Рис. 1.2. Определение направления электромагнитной силы (а), принцип действия электродвигателя постоянного тока (б)

На рис. 1.2, б статор выполнен в виде постоянного магнита, а ротор — цилиндра с намотанной на него 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 1.1.**

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  $\vec{B}$* ) определяется соотношением  $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cdot S \cos\alpha$  (рис. 1.3), 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 ЭДС  $e$  на концах проводника с длиной  $l$  при перемещении его со скоростью  $v$  в МП с индукцией  $B$ . ЭДС 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 ЭДС 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 ЭДС  $e$  пропорциональна скорости изменения потокосцепления  $\Psi$  этого контура во времени и, естественно, магнитного потока  $\Phi$  (следовательно, и индукции), т.е.

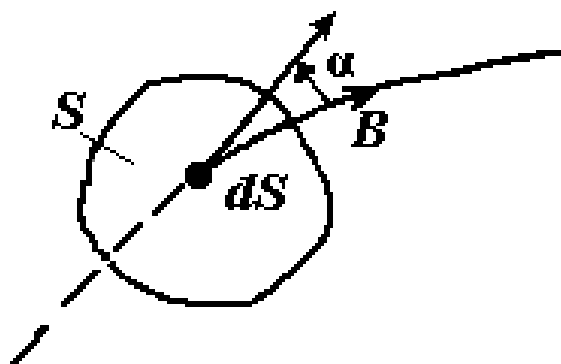


Рис. 1.3. Направление вектора  $\vec{B}$

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

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 1.2.**

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:  $I = H \cdot 2\pi a = 8,5 \cdot 6,28 \cdot 8 = 427$  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. 1.4.

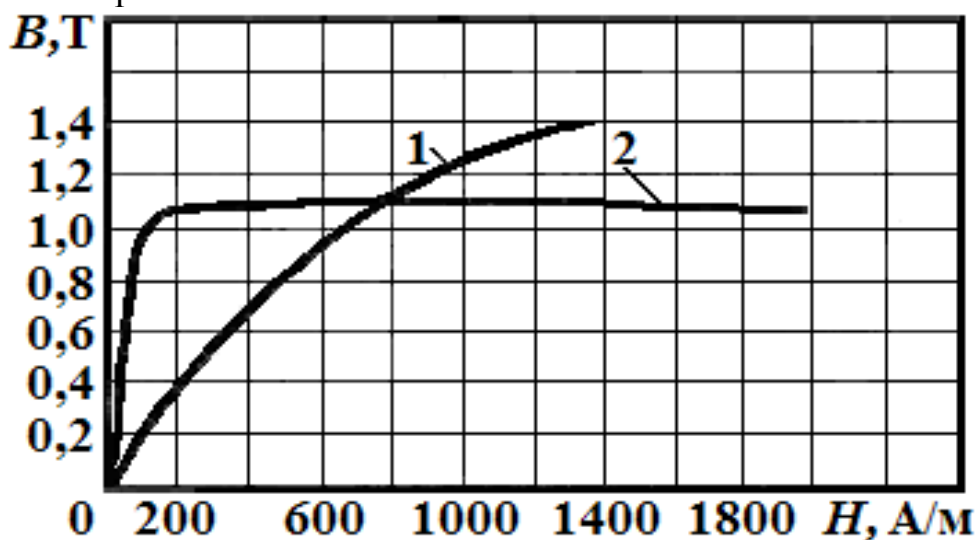


Рис. 1.4. Кривые ферромагнитных материалов:  
1 – листовая сталь; 2 – пермаллой (сплав железа, никеля и некоторых других материалов)

Характерными для этих кривых являются быстрый рост индукции с увеличением напряженности  $H$  поля (а следовательно, и намагничивающей силы) в начальной части кривой и постепенное уменьшение или 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 геометричес-

кой 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. 1.5). При этом  $H_{\max}$  и  $B_{\max}$  – напряженность и индукция при насыщении материала, а  $H_C$  и  $B_r$  – его коэрцитивная сила и остаточная индукция, соответственно.

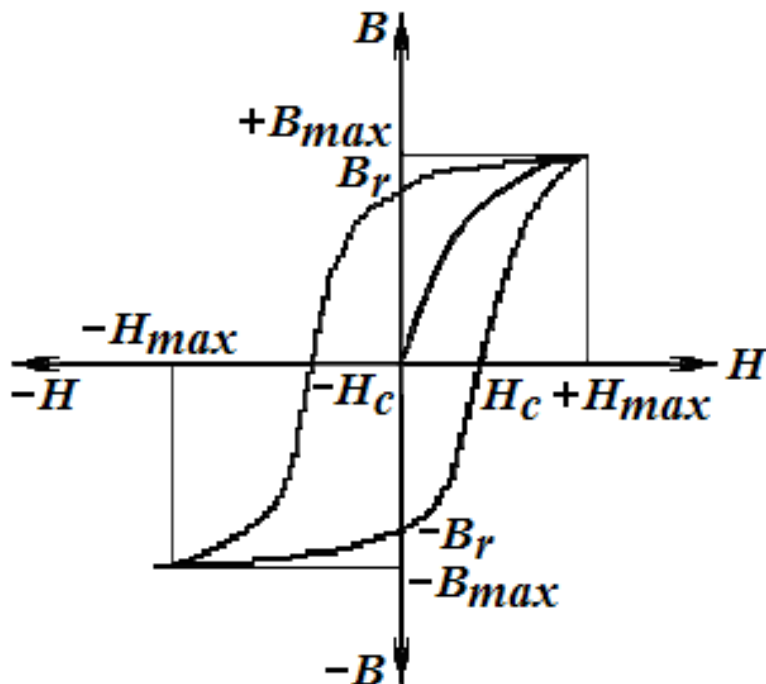


Рис. 1.5. Петля магнитного гистерезиса

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

*Магнитномягкие* 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  $768^\circ\text{C}$ ). 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, 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. 1.6), которая состоит из двух участков, причем  $l_i$  и  $S_i$  – длины и площади поперечных сечений участков магнитопровода, соответственно.

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 их измерения 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.

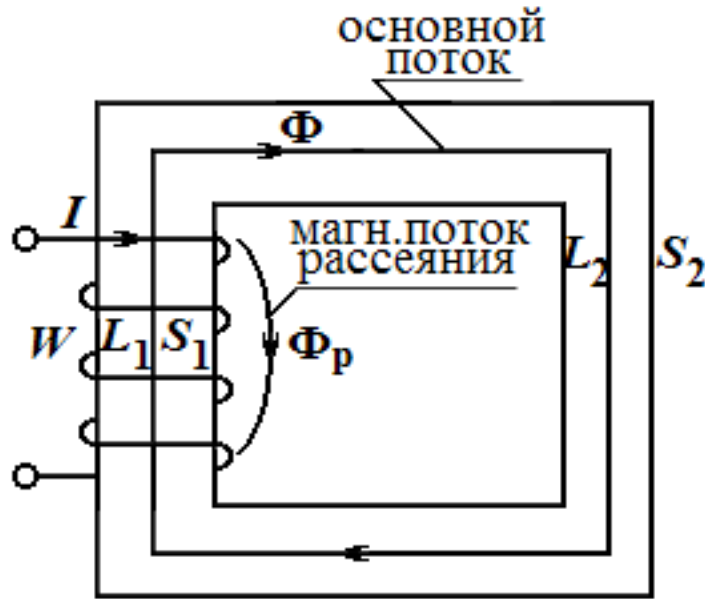


Рис. 1.6. Неразветвленная магнитная цепь

В разветвленных МЦ (рис. 1.7) 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. 1.7 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 выражение  $\oint H \cos \alpha dl = I_1 w_1 - I_2 w_2$ , которое при разбиении контура на участки с одной и той же площадью поперечного сечения приводится к виду:

$$H_1 l_1 + H_{p1} l_{p1} + H_4 l_4 - H_2 l_2 - H_{p2} l_{p2} - H_5 l_5 = I_1 w_1 - I_2 w_2.$$

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  $Hl$  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.

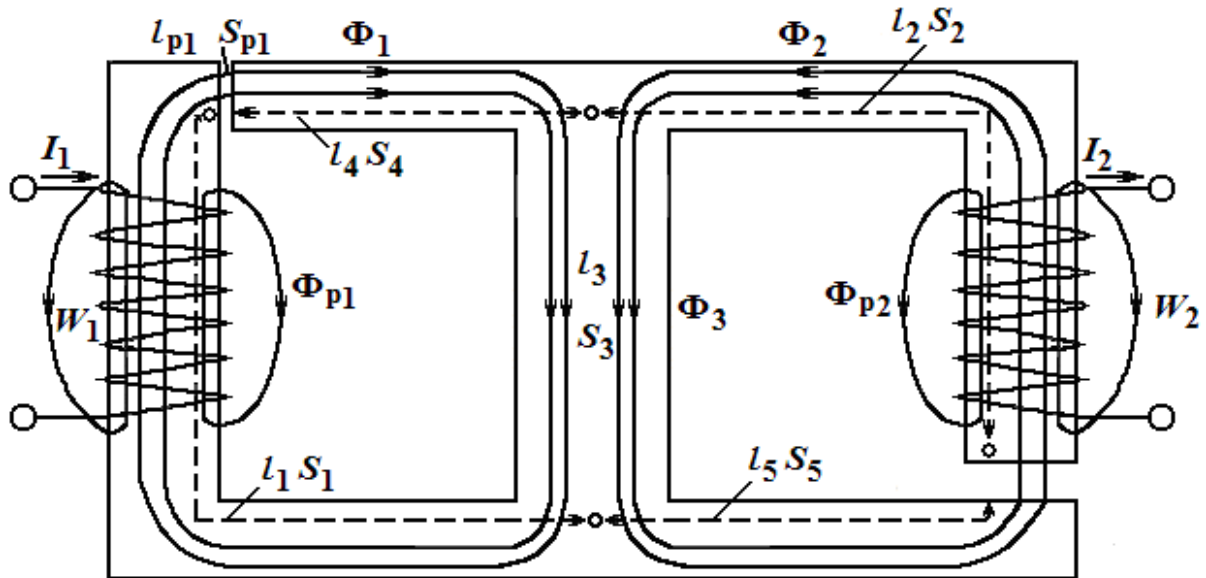


Рис. 1.7. Разветвленная магнитная цепь

### 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, измерении больших токов или напряжений, испытании изоляции.

Все трансформаторы имеют замкнутый стальной сердечник (рис. 1.8) – 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.

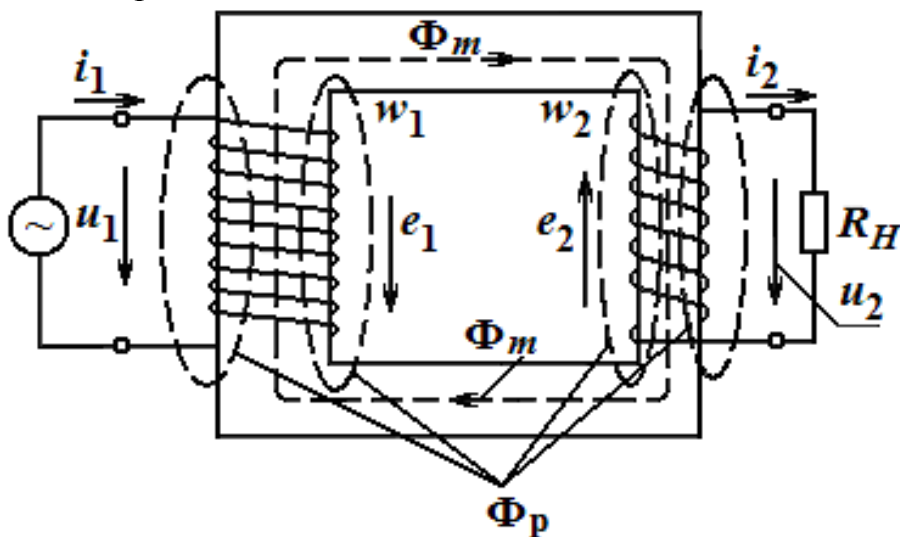


Рис. 1.8. Конструкция однофазного трансформатора

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 потоко-сцепление рассеяния  $\Psi_{p1}$  первичной обмотки.

Переменный основной поток  $\Phi(t)$  создает в обмотках ЭДС:

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

При синусоидальном  $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$  действующие значения трансформаторных ЭДС 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 ЭДС обмотки ВН к ЭДС обмотки НН называется коэффициентом трансформации:



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

ЭДС  $\dot{E}_2$  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  $\Phi$ , создаваемая 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. 1.9), для получения которого на первичную обмотку необходимо подать  $\dot{U}_{1\text{ном}}$ , а вторичную обмотку разомкнуть и обеспечить, таким образом,  $I_2 = 0$ .

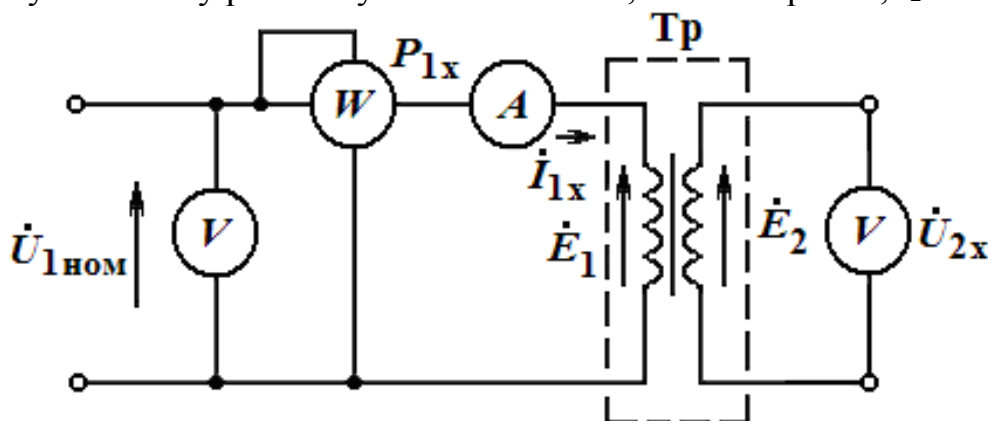


Рис. 1.9. Режим холостого хода трансформатора

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:

$$\cos \varphi_x = \frac{P_{1x}}{U_{1x} I_{1x}}; \quad n_{\text{Гр}} = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}; \quad \delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_x,$$

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.

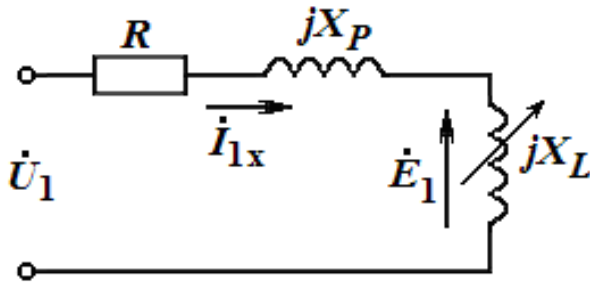


Рис. 1.10. Эквивалентная схема трансформатора в режиме холостого хода

Эквивалентная схема трансформатора в этом режиме имеет вид, приведенный на рис. 1.10. Она содержит активное сопротивление  $R_1$  первичной обмотки и две катушки: одна – линейная с индуктивным сопротивлением рассеяния  $jX_p$ , а другая – нелинейная с

ферромагнитным магнитопроводом, в которой основной поток наводит ЭДС  $E_1$ , а в магнитпроводе возникают потери энергии. При синусоидальном потоке  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  наводимые в обмотках ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  также синусоидальны и отстают по фазе от магнитного потока на угол  $\frac{\pi}{2}$ :

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

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

Из рис. 1.9 и 1.10 вытекают следующие уравнения состояния первичной и вторичной цепей, составленные по 2-му закону Кирхгофа:

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

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

Эти выражения позволяют построить векторную диаграмму трансформатора, работающего в режиме холостого хода (рис. 1.11).

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  $\dot{U}_1$ .

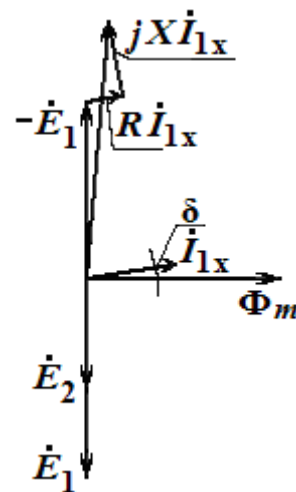


Рис. 1.11. Векторная диаграмма для режима холостого хода трансформатора

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 ЭДС 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  $n_{Tr} = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}$ , а по мощ-

ности  $P_{1x}$  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. 1.12, 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:

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

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

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

$$R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2} \text{ и}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

Эквивалентная схема трансформатора в режиме КЗ приведена на рис. 1.12, 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  $X_K = X_{P1} + X'_{P2}$ .

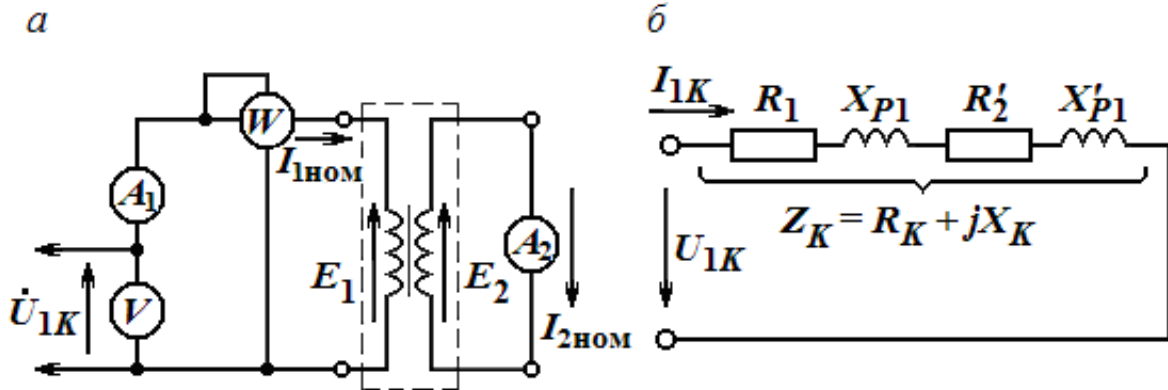


Рис. 1.12. Режим короткого замыкания трансформатора (а), эквивалентная схема трансформатора в этом режиме (б)

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 возрастает 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 ЭДС  $E_2$  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  $\Phi_m = E_1 / 4,44 f \cdot w_1 \approx \text{const}$  при изменении токов обмоток.

Эквивалентная схема трансформатора в режиме нагрузки приведена на рис. 1.13, 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  $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ .

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. 1.14 с поворотом на угол  $90^\circ$  по часовой стрелке.

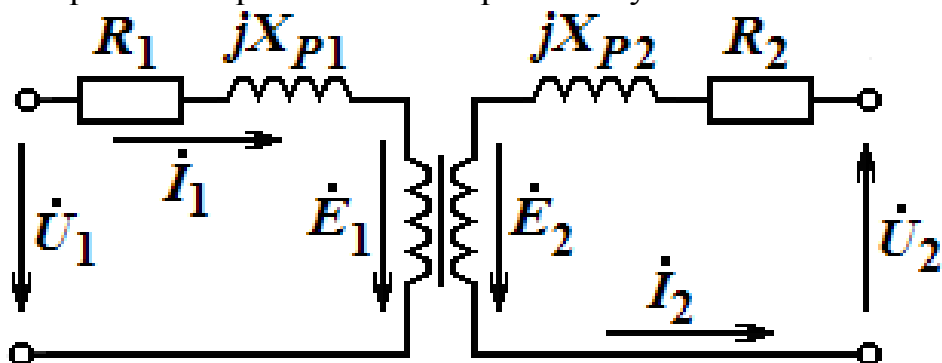


Рис. 1.13. Эквивалентная схема трансформатора в режиме нагрузки

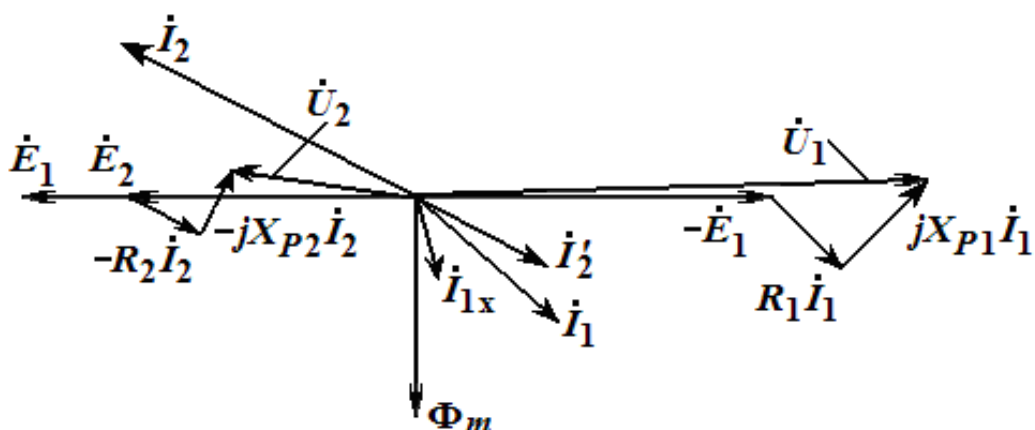


Рис. 1.14. Векторная диаграмма трансформатора в режиме нагрузки

Работа трансформатора под нагрузкой сопровождается увеличением потерь энергии по сравнению с режимом холостого хода. Кроме  $P_{ст}$  (мощность 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  $U_{1ном}$ . 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. 1.15 приведены упрощенные схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов.

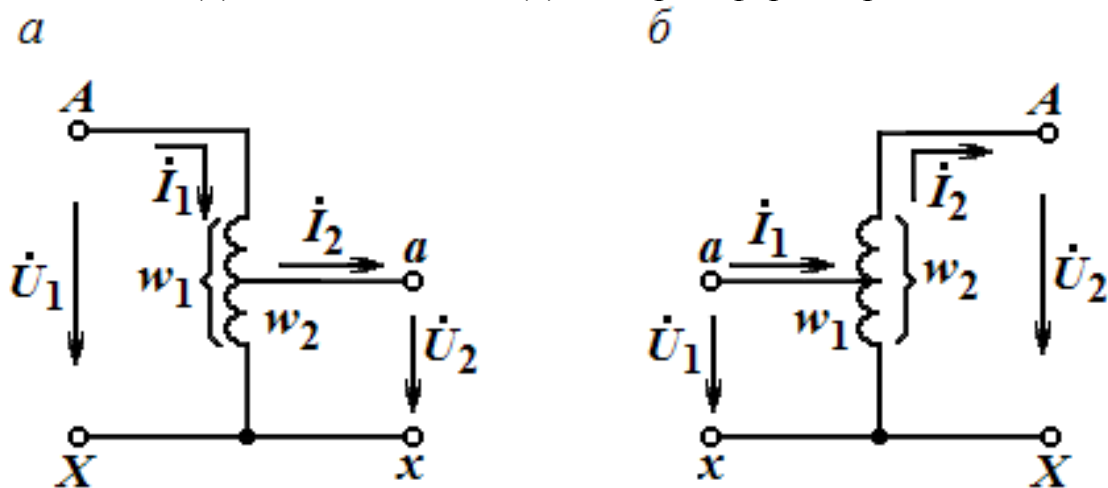


Рис. 1.15. Упрощенные схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов

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 ЭДС  $E_1 = U_1$  в первичной обмотке и ЭДС  $E_2 = U_2$  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  $A$  к зажиму  $a$  (рис. 1.15,  $a$ ) или от зажима  $a$  к зажиму  $A$  (рис. 1.15,  $b$ ) 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. 1.15 вариантов равна, соответственно:

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

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

где  $k_B$  – коэффициент 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, какую часть передаваемой номинальной мощности  $S_{0\text{ном}}$  автотрансформатора составляет 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*.

Измерительные 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. 1.16 показана схема включения измерительных приборов в однофазную цепь через трансформаторы напряжения и тока.

Для правильного включения ваттметров и других фазочувствительных приборов обмотки **трансформаторов напряжения** маркируют аналогично силовым трансформаторам:  $A - X$ ,  $a - x$ . Зажимы обмотки трансформатора тока,

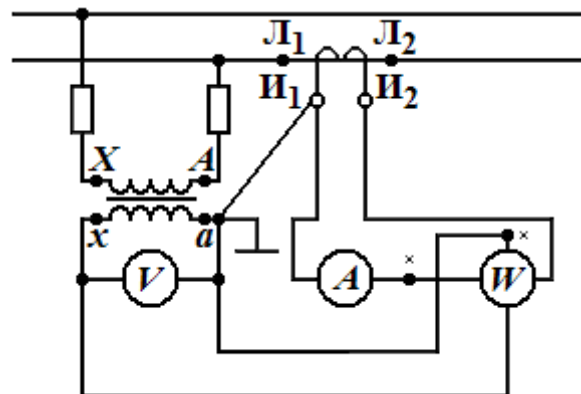


Рис. 1.16. Схема включения измерительных приборов в однофазную цепь

включаемой в линию, обозначают  $L_1 - L_2$ . Вторичные зажимы (измерительную цепь) обозначают  $I_1 - I_2$ . 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 ЭДС (до 1 кВ), опасная для жизни; поэтому на случай переключения трансформаторов тока в них предусматриваются специальные замыкатели вторичной обмотки накоротко.

К специальным трансформаторам можно также отнести **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 по сравнению с трехфазной группой.

### ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Рассчитать параметры магнитной цепи для магнитопровода, схема которого приведена на рис. 1.17. Все размеры даны в миллиметрах. Материал магнитопровода – сталь электротехническая, кривая намагничивания которой также приведена на рис. 1.17. 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 ее длину 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  $B_B = 1,2$  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:  $B_C = 1,2$  Т.

6) По кривой намагничивания (см. рис. 1.17) определяем величину напряженности магнитного поля в сердечнике при  $B_C = 1,2$  Т. Принимаем  $H_C = 900$  А/м.

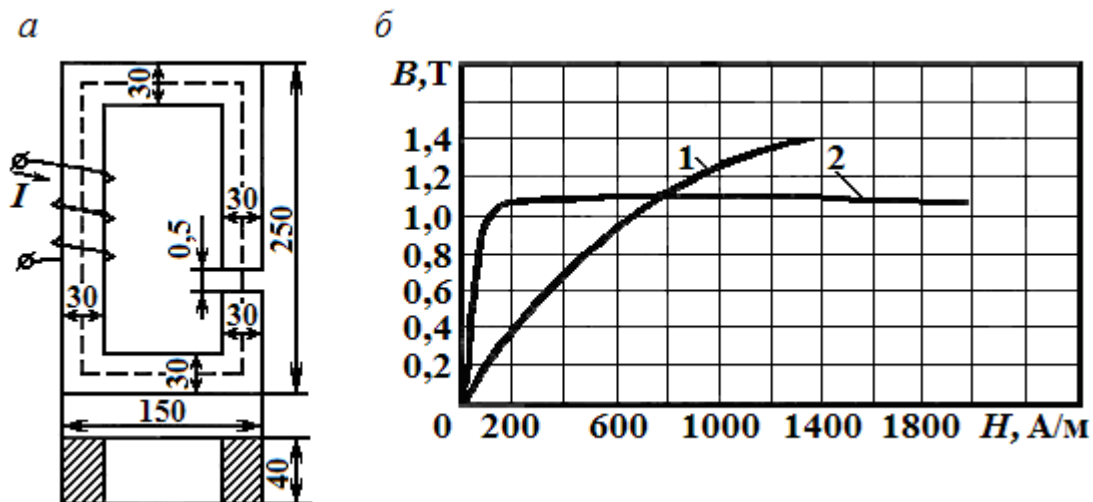


Рис. 1.17. Схема магнитопровода (а);  
кривые намагничивания ферромагнитных материалов (б):  
1 – листовая сталь; 2 – пермаллой

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) Находим намагничивающий ток в обмотке:

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

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, ЭДС вторичной обмотки, электрические и магнитные потери, номинальный КПД.

**Решение**

Приближенно можно считать, что ЭДС 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 вычисляем 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 ЭДС 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

$$P_{\text{э}} = P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 2,95^2 \cdot 1,2 + 4,85^2 \cdot 1,4 = 43,3 \text{ Вт.}$$

Магнитные потери

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

Сумма потерь

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

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{(220 \cdot 2,95) - 49,8}{220 \cdot 2,95} = 0,92.$$

### Контрольные вопросы

1. Объяснить конструкцию однофазного трансформатора.
2. Объяснить работу однофазного трансформатора.
3. Объяснить режимы работы однофазного трансформатора.
4. Каковы особенности специальных типов трансформаторов?
5. Каково применение трансформаторов в электротехнике?
6. Каковы основные параметры трансформаторов?

## 2. 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.

Машины постоянного тока состоят из статора и ротора (рис. 2.1). Их работа основана на явлении наведения ЭДС в проводниках, движущихся в магнитном поле, и появлении электромагнитных сил, действующих на проводники с током в магнитном поле.

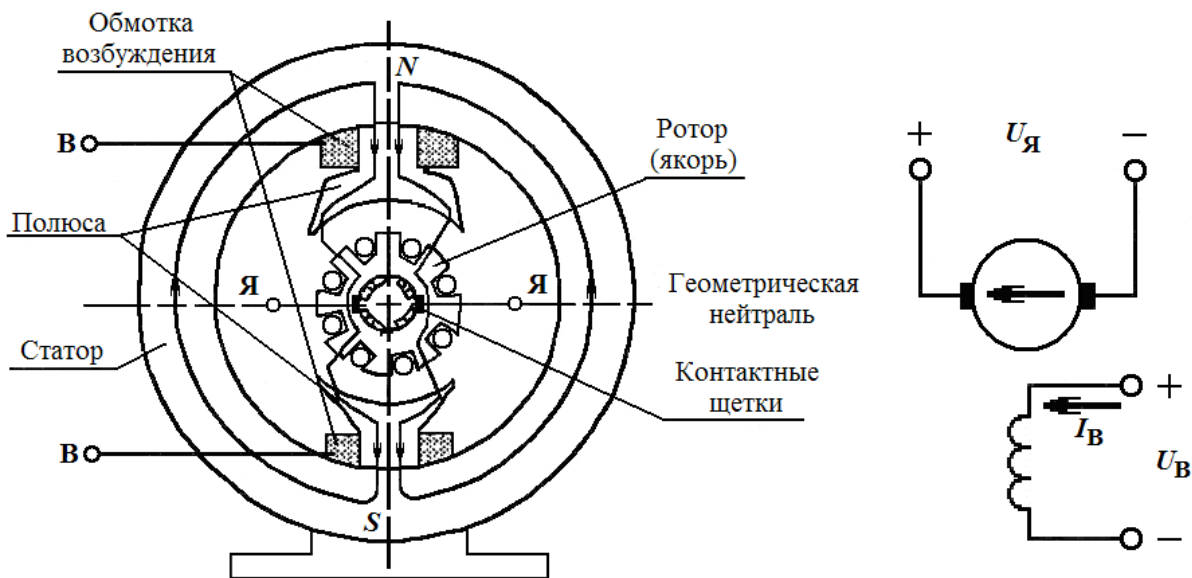


Рис. 2.1. Конструкция машины постоянного тока и схемы питания обмоток



Умножив обе части последнего 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 ЭДС 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.

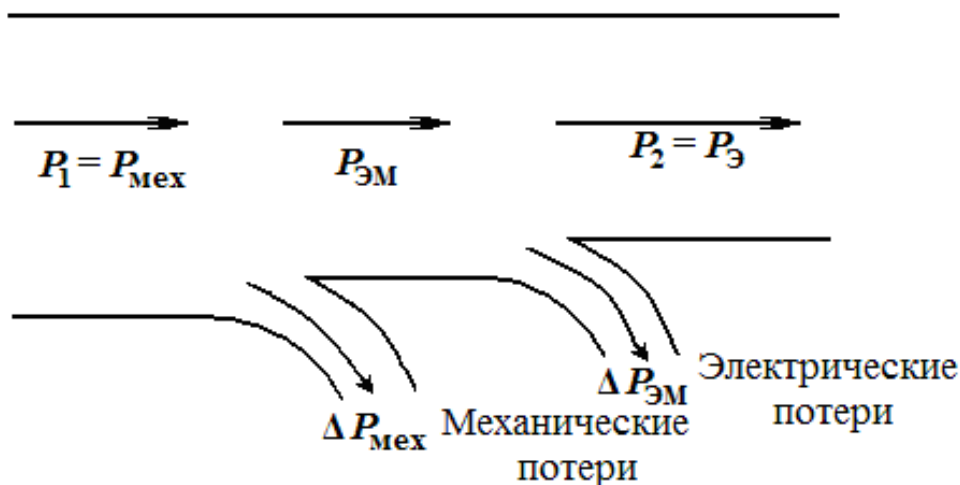


Рис. 2.3. Энергетическая диаграмма баланса мощностей генератора

Для генераторного режима характерно влияние магнитного поля якоря от протекающего по его обмотке тока  $I_{\text{я}}$  на магнитное поле статора, которое находится 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 осуществляется с помощью внешнего источника, щеточного механизма и коллектора. Поскольку на каждый проводник с током, находящимся в магнитном поле, всегда действует электромагнитная сила:  $F = B \cdot l \cdot I_{\text{я}}$ , якорь под действием этой силы начинает вращаться. От вращения якоря в его обмотке наводится ЭДС, которая направлена навстречу току  $I_{\text{я}}$  и называется противоЭДС  $E$  (рис. 2.4).

Отсюда вытекает, что уравнение состояния для двигателя имеет вид:

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}),$$

где  $(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})$  – полное сопротивление цепи якоря;

$R_{\text{д}}$  – добавочный переменный резистор.

Поскольку индукция в воздушном зазоре машины равна:

$$B = \frac{2p\Phi}{\pi D l},$$

где  $D$  – диаметр якоря;

$l$  – длина проводника, получена следующая формула для момента вращения:

$$M = c_{\text{М}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}.$$

Параметр  $c_{\text{М}} = \frac{pN}{2\pi \cdot a}$  является конструктивным коэффициентом дви-

гателя (постоянной двигателя), причем  $c_{\text{М}} = \frac{60 \cdot c_{\text{F}}}{2\pi}$ .

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:

$$U \cdot I_{\text{я}} = E \cdot I_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2, \Rightarrow P_{\text{э}} = P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{э}},$$

где  $P_{\text{э}}$  – подводимая электрическая мощность;

$P_{\text{эм}}$  – электромагнитная (внутренняя) мощность двигателя;

$\Delta P_{\text{э}}$  – электрические потери в цепи якоря.

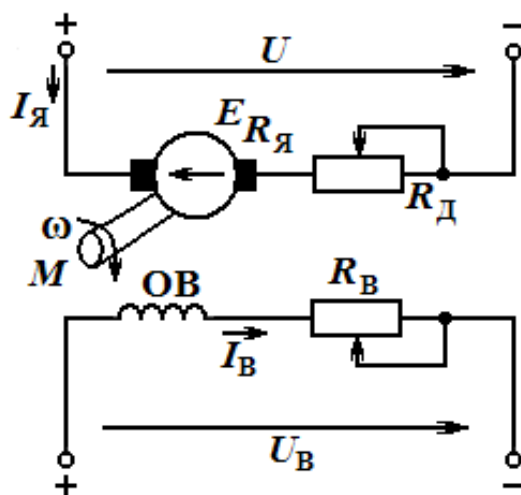


Рис. 2.4. Схемы питания обмоток двигателя постоянного тока

Последнее уравнение иллюстрируется энергетической диаграммой на рис. 2.5. 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  $\Phi_B$ ). Разные способы позволили разработать несколько разновидностей двигателей.

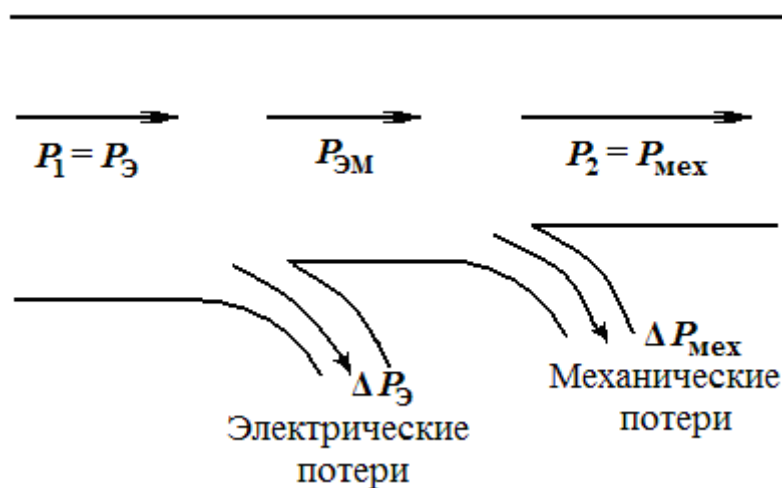


Рис. 2.5. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

### 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. 2.6, а), в которых вышеупомянутые обмотки подключаются к различным источникам;
- машины параллельного возбуждения (рис. 2.6, б), в которых обмотка возбуждения имеет большое число витков тонкого провода и, 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. 2.6, в), в которых обмотка возбуждения подключается последовательно с обмоткой якоря (получили название «сериесные электродвигатели»);
- машины смешанного (компаундного) возбуждения (рис. 2.6, г), в которых на каждом полюсном сердечнике имеются 2 катушки – параллельная (шунтовая) и последовательная (сериесная).



Машины с независимым возбуждением широко применяются в качестве генераторов и в качестве двигателей, т.к. они способны вырабатывать неизменное напряжение и поддерживать постоянную скорость, соответственно.

Параллельное возбуждение также используется 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 получили широкого распространения из-за непостоянства выходного напряжения.

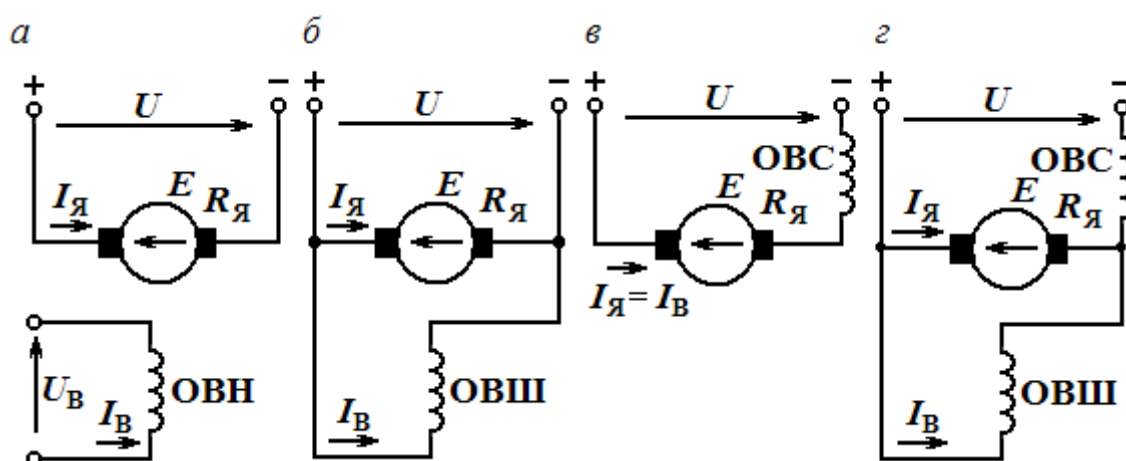


Рис. 2.6. Включение обмоток машин постоянного тока: независимого возбуждения (а), параллельного возбуждения (б), последовательного возбуждения (в), смешанного возбуждения (г)

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 широкое 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 противоЭДС, то начинают 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.

*Третий способ пуска* используется в специальных системах, называемых системами генератор – двигатель (Г – Д). Хотя система Г – Д дорога, 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  $\omega = \frac{E}{c\Phi}$ ,

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.  $I_{\text{я}} = \frac{M}{c\Phi}$ .

Характеристика, полученная при  $R_{\text{д}} = 0$ ,  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$  и  $U = U_{\text{ном}}$ , называется *естественной механической характеристикой*. Она считается жесткой. Изменив 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. 2.7, а) 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  $M_{\text{п}}$ .

В двигателе последовательного возбуждения (рис. 2.7, 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 (рис. 2.7,

в); отсюда следует, что при уменьшении нагрузки его скорость может резко возрасти и двигатель может пойти «вразнос». Чтобы не допустить этого, серийные двигатели постоянного тока используют в механизмах, не допускающих режима холостого хода.

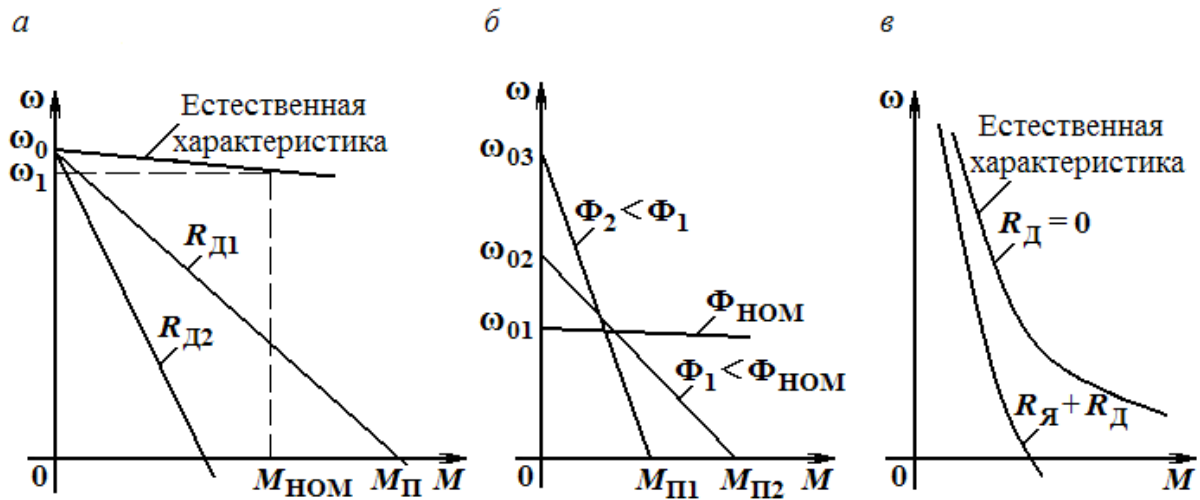


Рис. 2.7. Механические характеристики двигателей постоянного тока: параллельного возбуждения (а), последовательного возбуждения (б, в)

## 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 ЭДС 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.

ЭДС, 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:  $P_{\text{ЭМ}} = E_{\text{Я}} I_{\text{Я}} = 2420 \text{ Вт.}$

Потребляемая мощность:  $P_1 = U_1 I_{\text{НОМ}} = 220 \cdot 13,3 = 2926 \text{ Вт.}$

Номинальная мощность:  $P_{\text{НОМ}} = P_1 \eta = 2926 \cdot 0,752 = 2200 \text{ Вт.}$

Вращающий момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M = \frac{9,55 \cdot P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 2200}{1000} = 21 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

2. Генератор постоянного тока П51 с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: мощность  $P_{\text{НОМ}}=5 \text{ кВт}$ , напряжение  $U=230 \text{ В}$ , частота вращения  $n_{\text{НОМ}}=1450 \text{ об/мин}$ , сопротивление обмотки возбуждения  $R_{\text{В}}=91 \text{ Ом}$ , сопротивление цепи якоря  $R_{\text{Я}}=0,635 \text{ Ом}$ , магнитные и механические потери  $P_{\text{х}}=0,052$  от  $P_{\text{НОМ}}$ . Определить номинальный ток обмотки якоря, ЭДС обмотки якоря при номинальном режиме, потери электрические, сумму потерь, потребляемую (механическую) мощность, к.п.д. при номинальном режиме работы.

**Р е ш е н и е**

Сначала найдем номинальный ток генератора и ток обмотки возбуждения:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{5000}{230} = 21,74 \text{ А.}$$

$$I_{\text{В}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{\text{Я}}} = \frac{230}{91} = 2,52 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря равен:  $I_{\text{Я}} = I_{\text{НОМ}} + I_{\text{В}} = 21,74 + 2,52 = 24,26 \text{ А.}$

ЭДС, 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:

$$P_{\text{В}} = I_{\text{В}}^2 R_{\text{В}} = 2,52^2 \cdot 91 = 577,8 \text{ Вт.}$$

Магнитные и механические потери:  $P_x = P_M + P_{MX} = 0,052 \cdot P_{ном} = 260$  Вт.  
Сумма потерь при номинальном режиме:

$$\sum P = P_{я} + P_{в} + P_x = 373,7 + 577,8 + 260 = 1211,5 \text{ Вт.}$$

Потребляемая мощность  $P_1 = P_{ном} + \sum P = 5000 + 1211,5 = 6211,5$  Вт.  
КПД при номинальном режиме:

$$\eta = \frac{P_{ном}}{P_1} = \frac{5000}{6211,5} = 0,805.$$

### Контрольные вопросы

1. Каково общее устройство электрических машин постоянного тока?
2. Каковы области применения электрических машин постоянного тока?
3. Каковы разновидности двигателей постоянного тока?
4. Каковы механические характеристики двигателей постоянного тока?
5. Как регулировать скорость двигателей постоянного тока?
6. Как регулируется скорость вращения двигателя постоянного тока?

### 3. 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 19 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. 3.1), 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. 3.2, соответственно.

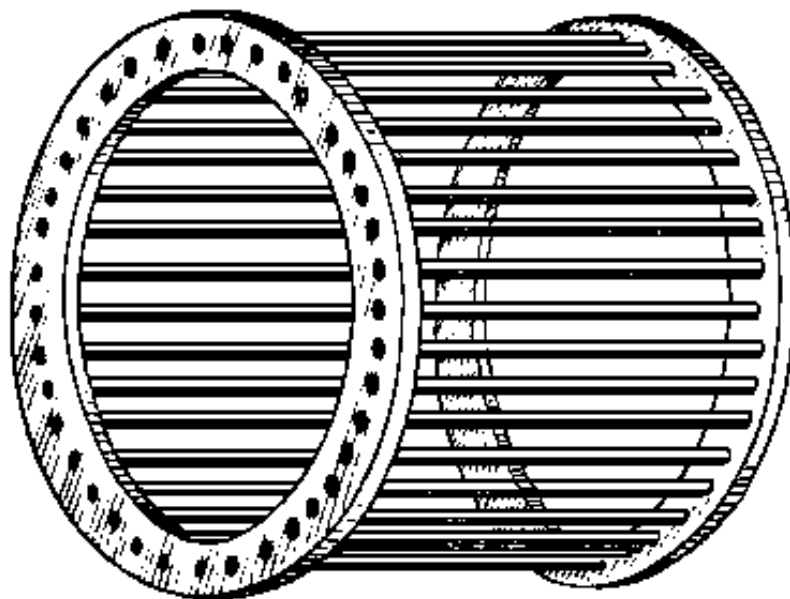


Рис. 3.1. Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронной машины

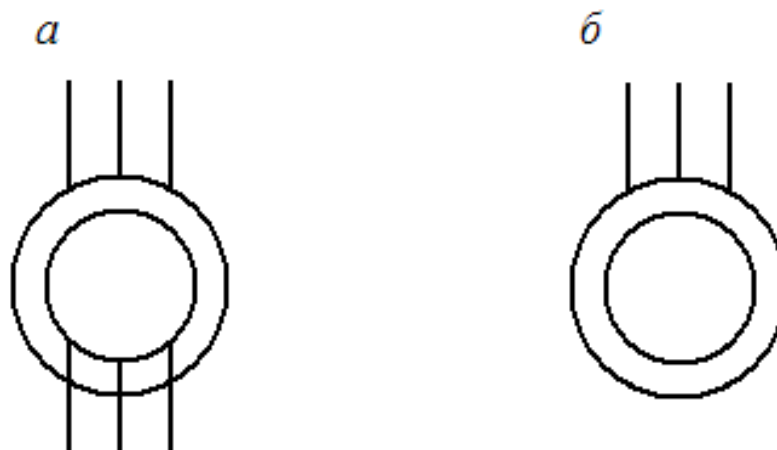


Рис. 3.2. Условные графические обозначения асинхронных двигателей: с фазным ротором (а), с короткозамкнутым ротором (б)

Магнитная система асинхронной машины (рис. 3.3) 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.

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.

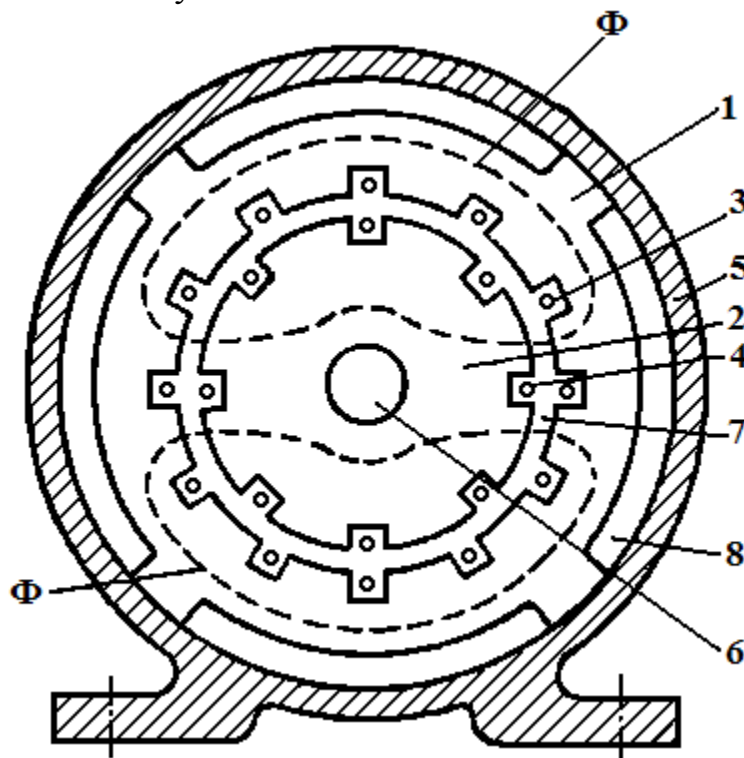


Рис. 3.3. Магнитная система асинхронной машины

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. 3.5), 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. 3.4). 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.

В начальный момент времени «а» ток первой фазы равен нулю, ток 2-й фазы имеет отрицательное значение, а ток 3-й фазы – положительное. Для момента времени «а» токи во всех 3-х рамках статора имеют следующие направления (рис. 3.5, 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 моментов 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.

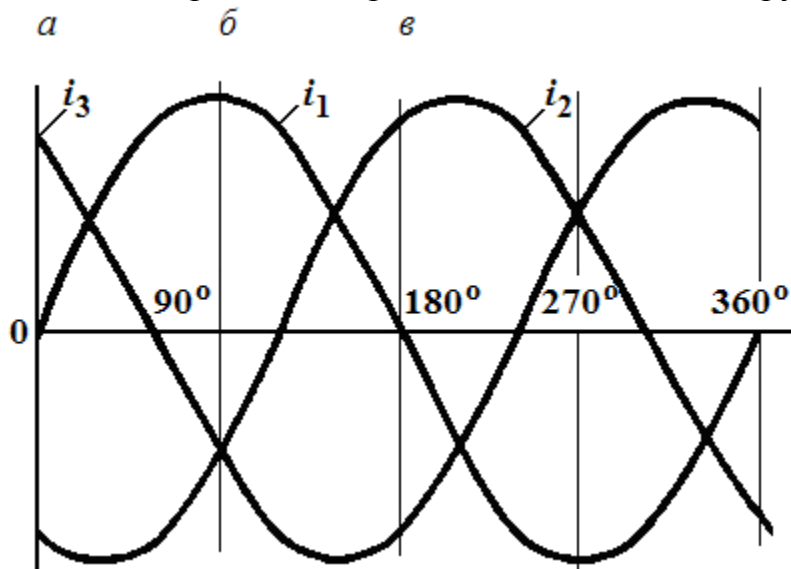


Рис. 3.4. Временные графики токов в фазах машины

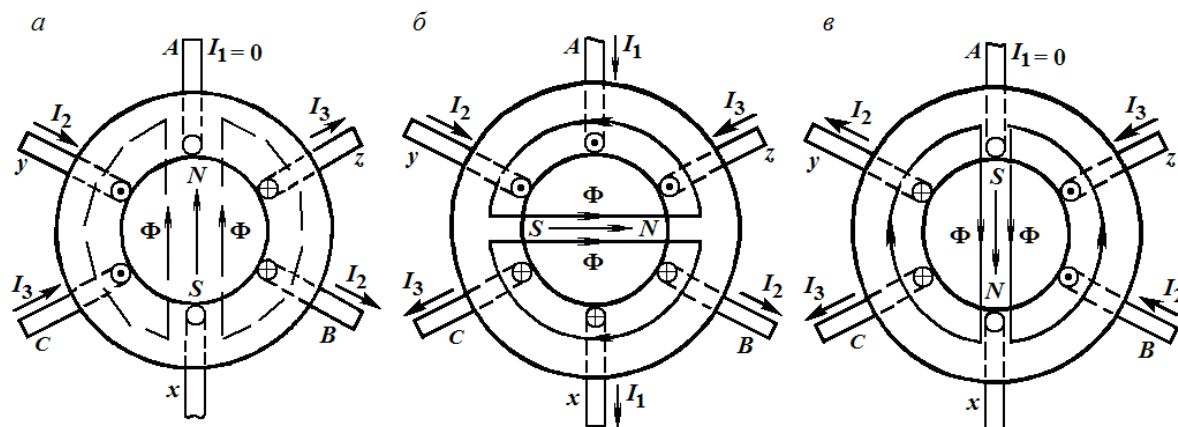


Рис. 3.5. Образование вращающегося магнитного поля в асинхронном двигателе

Таким образом, при подключении к статору асинхронного двигателя трехфазного переменного тока, внутри его возникает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется формулой

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (3.1)$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля статора (об/мин);  
 $f_1$  – частота тока питающей статор сети (Гц);  
 $p$  – число пар полюсов двигателя.

Когда магнитное поле статора начнет пересекать проводники ротора, в них возникнут ЭДС  $E_2$  и ток  $I_2$ , который вследствие индуктивности ротора будет отставать от  $E_2$  на угол  $\varphi_2$  (рис. 3.6). 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.

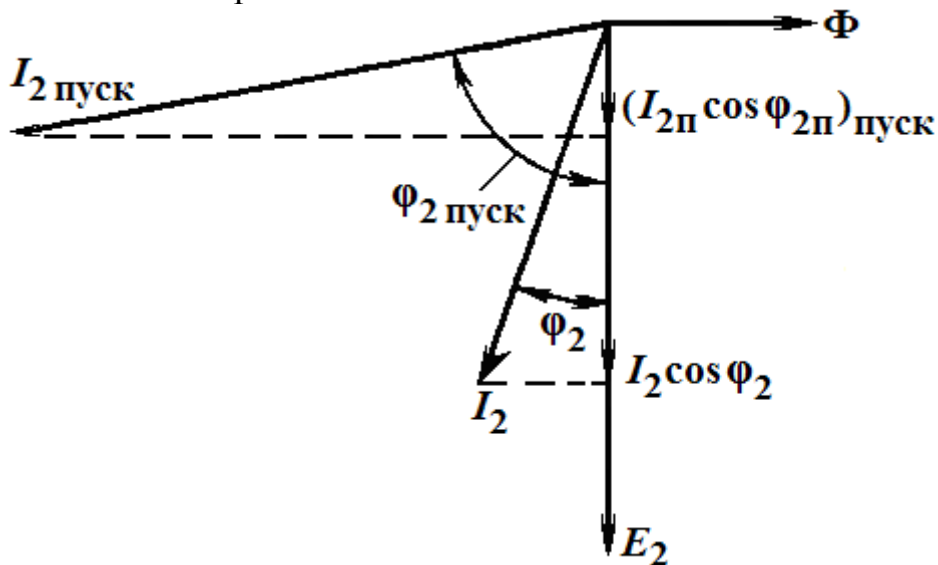


Рис. 3.6. Векторная диаграмма асинхронной машины

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 ЭДС 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 ЭДС 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

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% . \quad (3.2)$$

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, в результате возрастет относительная скорость движения проводников ротора в магнитном поле статора. Последнее приведет к увеличению наводимой в роторе ЭДС и тока. В результате вращающийся момент увеличится до величины, равной тормозному моменту. При уменьшении нагрузки на валу частота вращения ротора, наоборот, увеличится, а ЭДС 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 составляет:

$$s = \frac{(n_1 - 0)}{n_1} = 1 \text{ или } 100 \text{ \%}.$$

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 (3.1), 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 ЭДС в обмотках трансформатора и асинхронного двигателя одинаковы, то к ним тоже применимы формулы для определения трансформаторной ЭДС. Пока ротор двигателя неподвижен,

его обмотка пересекается вращающимся магнитным полем с частотой  $n_1$ . Тогда формула для действующего значения ЭДС одной фазы неподвижного ротора примет вид:

$$E_{2H} = 4,44w_2k_2f_1\Phi, \quad (3.3)$$

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 ЭДС 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 ЭДС в обмотке ротора:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}. \quad (3.4)$$

Чтобы ввести скольжение в выражение для  $f_2$ , умножим числитель и знаменатель на  $n_1$ :

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2) \cdot n_1}{60n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot \frac{pn_1}{60} = s \cdot f_1. \quad (3.5)$$

Таким образом, частота ЭДС в обмотке ротора пропорциональна скольжению. Теперь можно записать выражение для ЭДС обмотки ротора в общем случае:

$$E_2 = 4,44w_2k_2f_2\Phi = 4,44w_2k_2sf_1\Phi = sE_{2H}. \quad (3.6)$$

Поскольку в асинхронном двигателе обмотка ротора замкнута накоротко, то ЭДС 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:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2H}^2}}. \quad (3.7)$$

Отсюда видно, что ток в обмотке неподвижного ротора ( $s = 1$ ) имеет наибольшее значение, но по мере раскручивания ротора и при уменьшении 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:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{sX_{2H}}{R_2}.$$

Т.к.  $X_{2H} = \omega_1 L_2$  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

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2H})^2}}. \quad (3.8)$$

Теперь следует определить вращающий момент  $M$  асинхронного двигателя и изучить его зависимость от скольжения. Воспользуемся известной формулой:

$$M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2 = c\Phi \frac{sE_H}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2H})^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2H})^2}} = c\Phi \frac{E_{2H} R_2}{\frac{R_2^2}{s} + sX_{2H}^2}. \quad (3.9)$$

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. 3.7, а. 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.

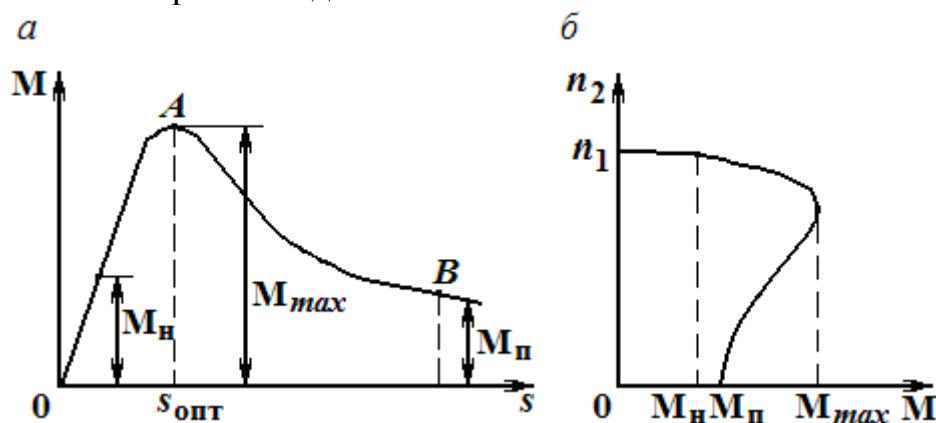


Рис. 3.7. Зависимости  $M$  от  $s$  (а),  $n$  от  $M$  (б) в асинхронном двигателе

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. 3.7, 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. 3.7, 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. 3.8). К статору асинхронной машины, работающей в двигательном режиме, из сети подводится мощность:

$$P_1 = 3U_{1\Phi}I_{1\Phi} \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cdot \cos \varphi. \quad (3.10)$$

Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в активном сопротивлении обмотки статора  $\Delta P_{1э} = 3R_1I_1^2$  и магнитных потерь  $\Delta P_{1м}$  в стали статора. В ротор посредством вращающегося магнитного поля передается электромагнитная мощность:

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{1э} - \Delta P_{1м}. \quad (3.11)$$

Часть электромагнитной мощности, полученной ротором, тратится на покрытие электрических потерь  $\Delta P_{2э}$  в его обмотке. Оставшаяся часть мощности  $P_{эм}$  превращается в механическую мощность:  $P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{2э}$ .

Магнитные потери в стали ротора  $\Delta P_{2м}$ , из-за малой частоты перемагничивания, практически отсутствуют. За вычетом незначительных потерь на трение  $\Delta P_{т}$  и добавочных потерь  $\Delta P_{доб}$ , механическая мощность двигателя отдается нагрузке и является выходной полезной мощностью:

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{т} - \Delta P_{доб} = M \cdot \omega_2 = \frac{M \cdot n_2}{9,55}, \quad (3.12)$$

где  $P_2$  в Вт, а  $M$  – в Н·м,  $n_2$  – в об/мин.

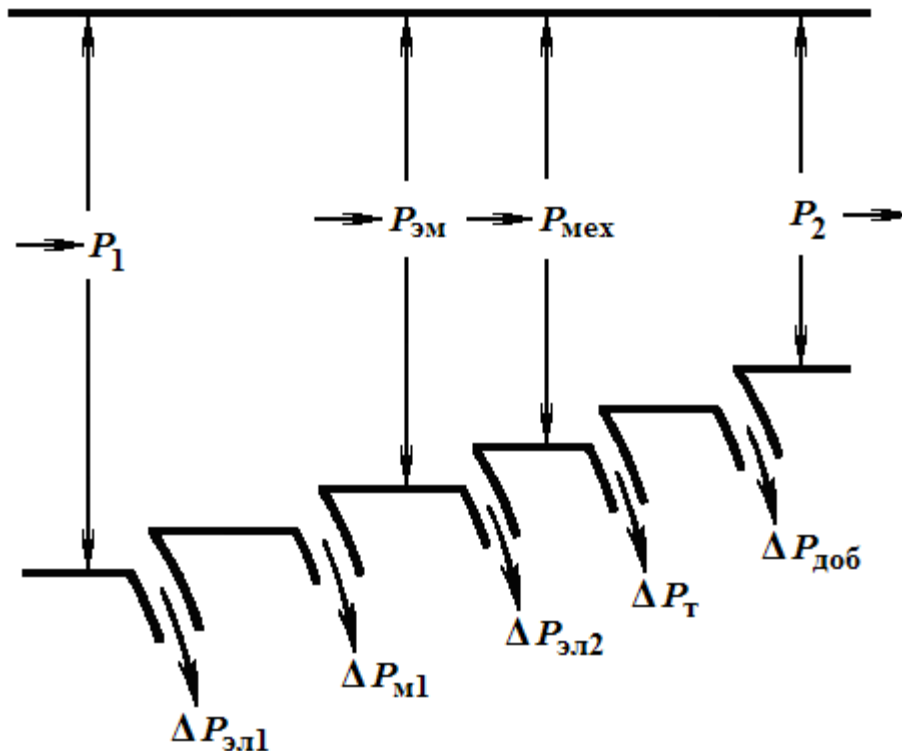


Рис. 3.8. Энергетическая диаграмма мощностей асинхронного двигателя

### Вращающий момент на валу двигателя:

$$M = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_2} = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\omega_1}, \quad (3.13)$$

где  $E_2$  и  $I_2$  – ЭДС и ток в роторе;

$\varphi_2$  – угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора.

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя (рис. 3.9) называют зависимости частоты вращения ротора  $n_2$  или скольжения  $s$  от момента на валу  $M_2$ , тока статора  $I_1$ , КПД  $\eta$  и  $\cos \varphi_1$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ ; их определяют экспериментальным или расчетным путем по схеме замещения. 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

$$P_2 = M_2 \omega_2 = \frac{M_2 2\pi n_2}{60}. \quad (3.14)$$

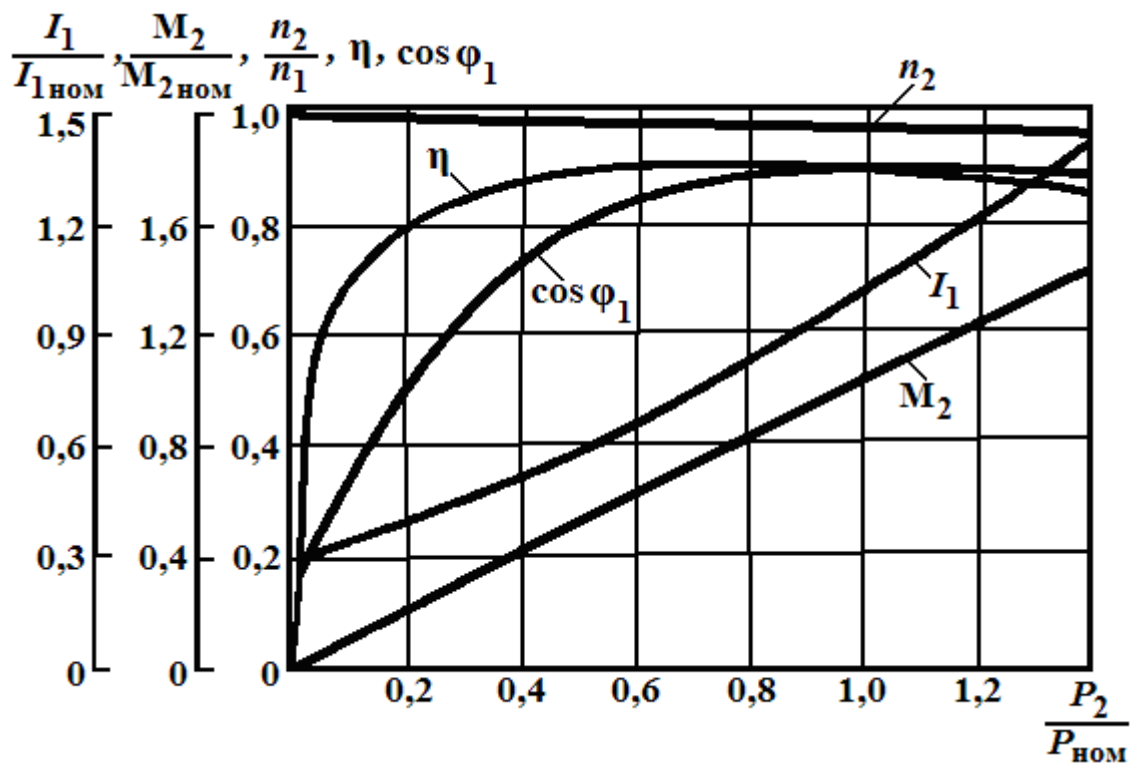


Рис. 3.9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Поскольку  $n_2$  изменяется мало, зависимость  $M_2 = f(P_2)$  близка к прямой. Активная составляющая тока  $I_1$  пропорциональна полезной мощности, в то время как его реактивная составляющая в диапазоне рабочих нагрузок асинхронного двигателя изменяется незначительно; зависимость  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  носит такой же характер, как и для трансформатора. Максимальный КПД:  $\eta_{\max} = 0,7 - 0,9$  – для машин средней мощности и  $\eta_{\max} = 0,9 - 0,92$  – для машин большой мощности.

### Пуск, регулирование скорости и торможение асинхронных двигателей

Для пуска асинхронного двигателя требуется сначала немного разгрузить его, т.е. выполнить условие  $M < M_{\text{п}}$ , 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. 3.10), каждая фаза  $r_{\text{п}}$  которого через щетки и контактные кольца (не показаны на рис. 3.10) включена в одну из фаз ротора.

В начале пуска реостат введен полностью и  $r_{\text{п}} = \text{max}$  (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 либо применяют автотрансформаторный пуск, либо делают переключение обмоток (сначала «звезда», а потом «треугольник»), чтобы понизить напряжение при пуске и ограничить пусковой ток.

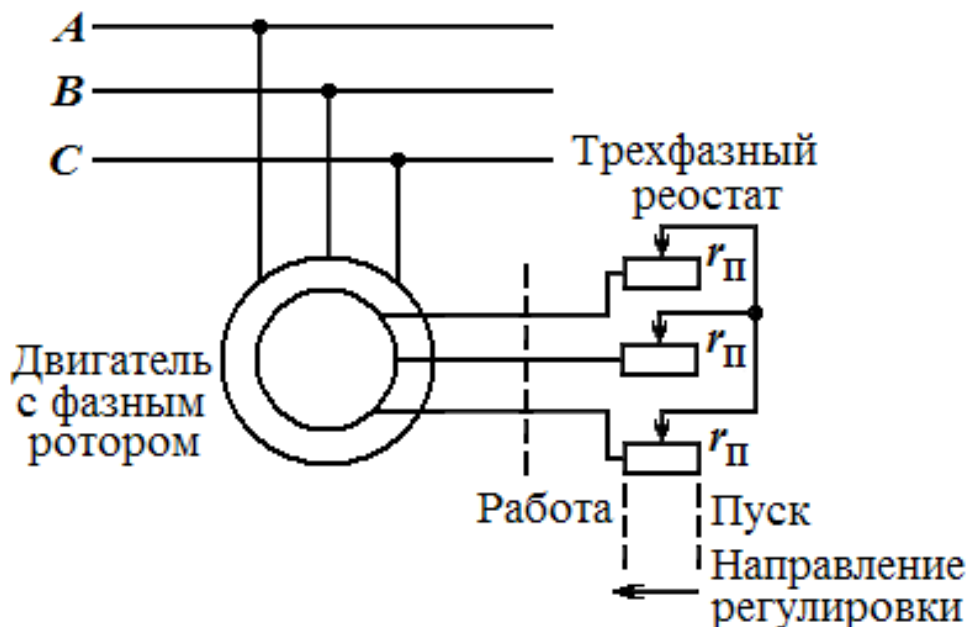


Рис. 3.10. Схема пуска асинхронного двигателя

Для изменения скорости вращения асинхронного двигателя используют 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 реализации 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 ЭДС. Оно

также позволяет плавно регулировать скорость вращения ротора в сторону уменьшения по сравнению с номинальной.

Поскольку все электрические машины считаются *обратимыми*, они 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, чтобы предотвратить 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 ЭДС, индуцируемую в фазе обмоток статора и ротора, асинхронного короткозамкнутого двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, коэффициент трансформации и процентное значение ЭДС 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  $U_1 = 380$  В, число витков в каждой фазе статора  $w_1 = 88$ , ротора  $w_2 = 12$ , магнитный поток  $\Phi = 1,21 \cdot 10^{-2}$  Вб, обмоточный коэффициент статора  $K_{01} = 0,92$ , ротора  $K_{02} = 0,95$ , частота тока  $f = 50$  Гц.

**Решение**

Определяем ЭДС, индуцируемую в фазе обмотки статора:

$$E_1 = 4,44f_1w_1\Phi_mK_{01} = 4,44 \cdot 50 \cdot 88 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot 0,92 = 217,5 \text{ В.}$$

ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки неподвижного ротора, равна:

$$E_2 = 4,44f_1w_2\Phi_mK_{02} = 4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 30,6 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации представляет собой отношение ЭДС обмотки статора к ЭДС обмотки ротора:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{217,5}{30,6} = 7,1.$$

ЭДС, 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 ЭДС 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  $n_2 = 980 \text{ об/мин}$ , 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  $U = 220 \text{ В}$ ?

**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 находим 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

$$M_{\text{ном}} = \frac{9,55P_2}{n_2} = \frac{9,55 \cdot 40000}{980} = 389,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Максимальный момент

$$M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 389,8 = 701,6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = K_M M_{\text{ном}} = 1,1 \cdot 389,8 = 428,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

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  $U_1 = 220 \text{ В}$ , и по схеме «звезда», если в сети линейное напряжение  $U_1 = 380 \text{ В}$ .

Определим фазный, линейный и пусковой токи при линейном напряжении  $U_1 = 220 \text{ В}$  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  $P_{\text{ном}}=75$  кВт, номинальное напряжение сети  $U_{\text{ном}} = 220$  В, номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} = 0,015$ , 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  $f = 50$  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  $n_{2\text{ном}} = n_1(1 - s) = 1000(1 - 0,015) = 985$  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

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 727 = 1308,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Пусковой вращающий момент

$$M_{\text{п}} = \frac{K_M}{M_{\text{ном}}} = \frac{1,1}{727} = 799,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = \frac{75000}{0,925} = 81081 \text{ Вт.}$$

Из формулы мощности  $P_1 = 3U_{\text{ф}}I_{\text{ф}}\cos\varphi$  определяем номинальный фазный ток в обмотках статора при соединении в треугольник:

$$I_{\text{Фном}} = \frac{P_1}{3U_{\text{ф}} \cos\varphi} = \frac{81081}{3 \cdot 220 \cdot 0,92} = 133,5 \text{ А.}$$

Линейный номинальный ток

$$I_{\text{ЛНОМ}} = \sqrt{3}I_{\text{ФНОМ}} = 1,73 \cdot 133,5 = 231 \text{ А.}$$

Умножая линейный ток на кратность пускового тока, получаем пусковой ток

$$I_{\text{П}} = K_{\text{Г}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 6 \cdot 231 = 1386 \text{ А.}$$

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 находим из формулы мощности холостого хода

$$P_{\text{Х}} = \sqrt{3}U_{\text{Ф}}I_{\text{Ф}} \cos \varphi,$$

откуда 
$$I_{\text{Х}} = \frac{P_{\text{Х}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{Х}}} = \frac{6081}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,2} = 79,9 \text{ А.}$$

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

$$P_{\text{С}} = P_1 - P_{\text{ЭМ}} = 81081 - 76125 = 4956 \text{ Вт.}$$

Потери энергии в роторе

$$P_{\text{Р}} = \Sigma P - P_{\text{С}} = 81081 - 4956 = 1125 \text{ Вт.}$$

Общее сопротивление фазы при номинальной нагрузке

$$Z_{\text{Ф}} = \frac{U_{\text{ФНОМ}}}{I_{\text{ФНОМ}}} = \frac{220}{133,5} = 1,65 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление фазы  $R_{\text{Ф}} = Z_{\text{Ф}} \cos \varphi \cdot 0,92 = 1,5 \text{ Ом.}$

Индуктивное сопротивление  $X_{\text{Ф}} = \sqrt{Z_{\text{Ф}}^2 - R_{\text{Ф}}^2} = \sqrt{1,65^2 - 1,5^2} = 0,68 \text{ Ом.}$

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

$$f_{2\text{мах}} = f_1 \cdot s_{\text{КР}} = 50 \cdot 0,049 = 2,45 \text{ Гц.}$$

### Контрольные вопросы

1. Каково общее устройство асинхронной электрической машины?
2. Каков общий принцип действия асинхронной электрической машины?
3. Каковы механические и рабочие характеристики асинхронных двигателей?
4. Объяснить схему пуска асинхронного двигателя.
5. Как изменяется скорость вращения асинхронного двигателя?



## 4. 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 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. 4.1, *а* и *б* представлены электрические схемы статора и ротора, а также условное графическое обозначение машины в схемах, соответственно.

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 генерируемого 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/ч. 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.

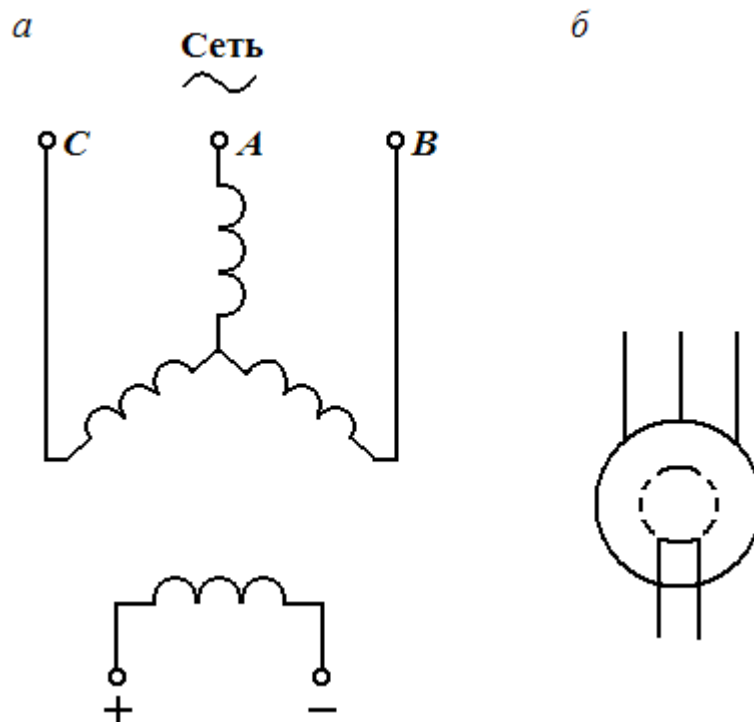


Рис. 4.1. Схемы включения обмоток статора и ротора синхронной машины (а), условное обозначение синхронной машины (б)

### Принцип действия синхронного генератора

Для реализации генераторного режима (рис. 4.2) в обмотку ротора синхронной машины требуется подать постоянное напряжение и обеспечить непрерывное его вращение 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 ЭДС  $\dot{E}_A, \dot{E}_B$  и  $\dot{E}_C$ . Поскольку магнитное поле ротора зависит от тока возбуждения  $I_B$ , то и значения генерируемых ЭДС 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 ЭДС также постоянна, а зависимость

$E = f(I_B)$  подобна зависимости  $\Phi_m$  от тока возбуждения  $I_B$  (или  $B$  от  $H$  в основной петле гистерезиса).

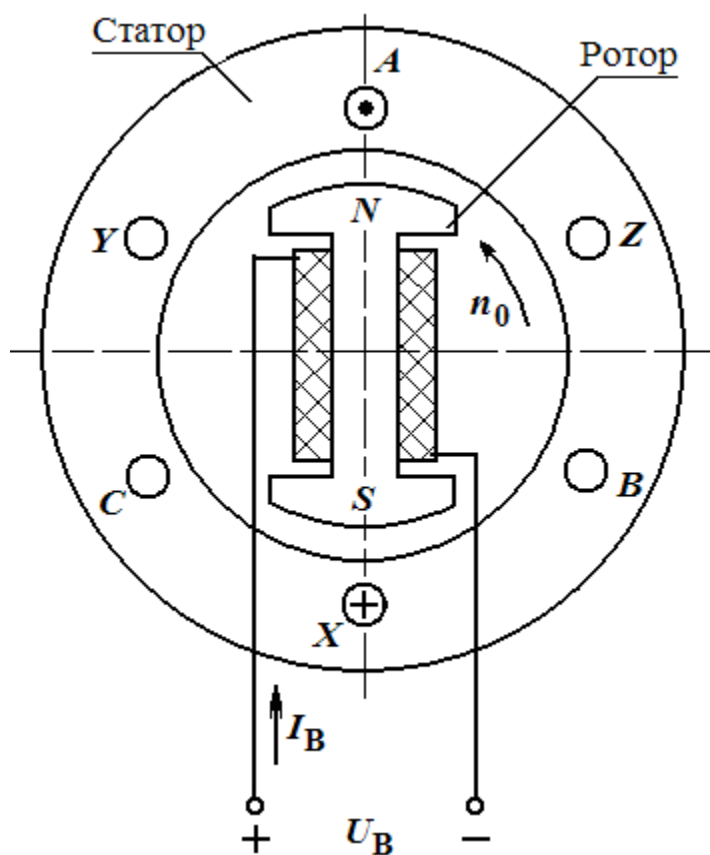


Рис. 4.2. Включение синхронной машины в режиме генератора

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.  $\Phi_m = \Phi_P + \Phi_C$ , то ЭДС индукции в обмотках статора также возрастает.

Электрическая мощность синхронного генератора при симметричной нагрузке равна:  $P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$ .

Механическая мощность приводного двигателя равна:  $P_{МХ} = M \cdot \omega_0$ , 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  $M = \frac{3U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\omega_0}$  на приводной двигатель.

### Контрольные вопросы

1. Каковы разновидности и устройство синхронных электрических машин?
2. Каково назначение синхронных электрических машин?
3. Каков принцип действия синхронного генератора?

## 5. ЭЛЕКТРОПРИВОД И СЧЕТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 5.1. Общие сведения

**Электроприводом** называется электромеханическое устройство, состоящее из электродвигателя, передаточного механизма, соединяющего электродвигатель с исполнительным механизмом, и аппаратуры управления (рис. 5.1).

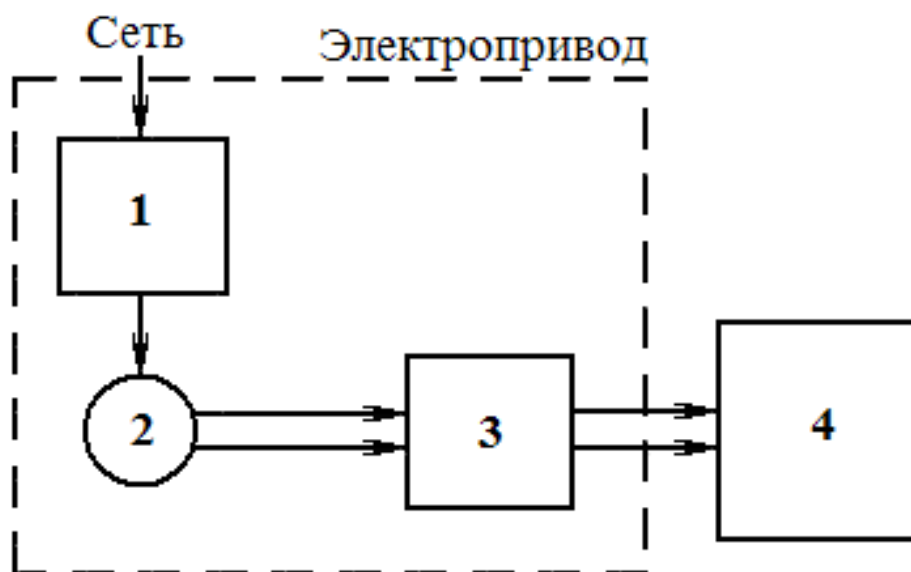


Рис. 5.1. Структурная схема электропривода

Производственные машины и механизмы приводятся в движение электроприводом. Электрическая часть электропривода состоит из электродвигателя 2 и аппаратуры управления двигателем 1, с помощью которой управляют движением производственной машины или механизма 4. Механическая часть электропривода 3, связывающая электродвигатель с производственной машиной или механизмом, может состоять из различных элементов: муфт сцепления, зубчатых передач и т.д. (см. рис. 5.1). Совокупность электропривода и производственной машины или механизма составляет электрифицированный агрегат. Управление агрегатом осуществляется с помощью аппаратуры управления. Агрегаты могут быть оборудованы одним или несколькими электрическими двигателями.

Одновидательный, или одиночный, электропривод применяется, когда приводятся в действие простые станки, лифты, транспортеры.

Сложные машины или механизмы снабжаются несколькими электрическими двигателями. Такой многодвигательный электропривод применяется, например, в мостовых кранах.

В зависимости от степени участия человека в процессе управления электроприводом различают: неавтоматический, полуавтоматический и автоматический электроприводы.

*Неавтоматическим* называют такой привод, когда включение и выключение двигателя, изменение скорости или направления вращения его вала производятся оператором, воздействующим на определенные устройства аппаратуры управления, за счет его мускульной силы.

При *полуавтоматическом* (или дистанционном) управлении – управлении на расстоянии – переключения в цепях аппаратуры управления производятся аппаратами, контакты которых приводятся в движение силой тяги электромагнитов, вспомогательных двигателей. Роль оператора сводится к воздействию на кнопки управления.

В *автоматическом* электроприводе управление осуществляется без непосредственного участия человека. Созданы автоматические линии станков, цехи-автоматы, где все операции – от подачи заготовок до упаковки изделий – выполняются автоматически.

Двигатель и электропривод в целом могут работать в следующих режимах: продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном.

При *продолжительном* режиме температура всех частей электрической машины и электропривода через некоторое время достигает установившегося значения  $T_{уст}$  и длительность работы двигателя и электропривода в целом обуславливается этой температурой. Работа электропривода продолжается до тех пор, пока его температура не превысит  $T_{уст}$ . В качестве примера использования такого режима можно отнести механизмы: водяные насосы, вентиляторы, компрессоры.

При *кратковременном* режиме электродвигатель и электропривод в целом находятся в рабочем состоянии небольшой период  $t_p$ , и за это время температура электропривода не успевает достигнуть установившегося значения, а за время паузы его температура успевает снизиться до температуры окружающей среды  $T_{oc}$ .

Длительность периода нагрузки  $t_p$  для выпускаемых промышленностью двигателей принята равной 10, 30, 60, 90 мин. В кратковременном режиме работают электроприводы шасси самолетов, разводных мостов и т.д.

При *повторно-кратковременном* режиме периоды нагрузки  $t_p$  чередуются с периодами отключения электродвигателя  $t_0$  (паузами), причем ни в один из периодов  $t_p$  температура электропривода не достигает установившегося значения, а в период  $t_0$  электропривод не успевает охладиться до  $T_{oc}$ .

Повторно-кратковременный режим работы электропривода характеризуется относительной продолжительностью включения

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100.$$

Продолжительность включения выпускаемых промышленностью двигателей принята равной 15, 25, 40, 60 %, а продолжительность цикла, т.е.  $t_p + t_o$ , не должна превышать 10 мин. В таком режиме работают электроприводы кранов, экскаваторов, прокатных станов, лифтов.

Показателем использования электродвигателя может служить максимальная температура, до которой он нагревается в процессе работы, так как перегрев обмоток и деталей выводит двигатель из строя. В зависимости от вида режима работы электропривода определяют номинальную мощность электродвигателя.

Важным вопросом является выбор типа электродвигателя.

При частых пусках и переменной нагрузке наиболее надежными, простыми и дешевыми являются короткозамкнутые асинхронные двигатели или асинхронные двигатели с кольцами (с фазным ротором) при большей мощности. Они используются, например, в пассажирских подъемниках – лифтах, в шахтных подъемных установках (мощность до 100 кВт).

Для привода производственных машин средней и большой мощности, работающих в продолжительном режиме с резкими пусками (например компрессоры, мощные насосы), рекомендуется применять синхронные машины, имеющие более высокий КПД по сравнению с асинхронными машинами. Для малой мощности синхронные машины применять экономически нецелесообразно.

Двигатели постоянного тока независимого возбуждения используются главным образом там, где допустимо незначительное изменение скорости при изменении нагрузки. Эти двигатели применяются в электроприводах для прокатных станов, лифтов высотных зданий и т.д.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, способный развивать большой момент при сильных увеличениях нагрузки, используется как тяговый двигатель трамваев, поездов метрополитена и т.д.

## 5.2. 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 проволока 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.

### 5.3. Управление пуском короткозамкнутого асинхронного двигателя

На рис. 5.2 показана схема дистанционного управления пуском и остановом асинхронного короткозамкнутого двигателя с помощью магнитного пускателя МП и кнопок С (стоп) и П (пуск).

В силовую цепь (линейные проводники) включены рубильник Р для снятия напряжения, предохранители Пр, главные контакты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  магнитного пускателя с искрогасительными камерами, тепловые реле РТ магнитного пускателя, служащие для защиты двигателя М от перегрева, вызванного перегрузками. Все элементы магнитного пускателя (силовые контакты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и дополнительные контакты  $K_4$ , контакты тепловых реле РТ) показаны в нормальном положении, т.е. при выключенном магнитном пускателе.

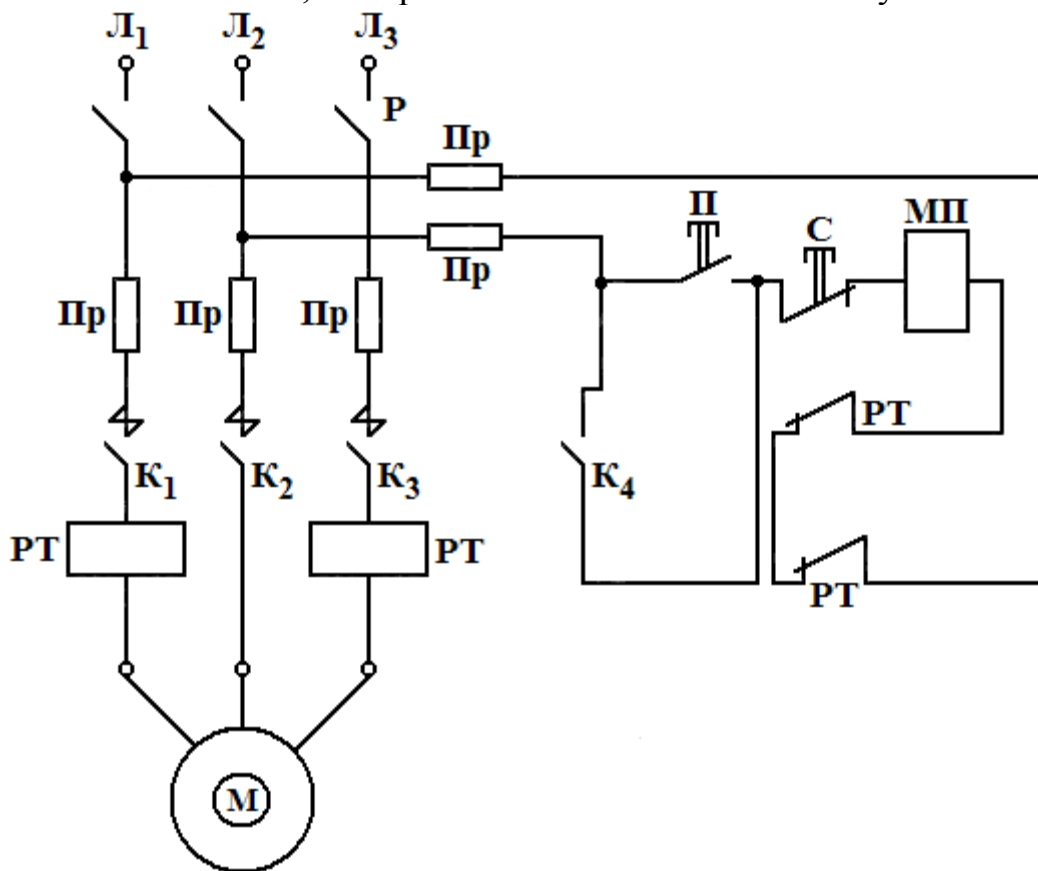


Рис. 5.2. Схема дистанционного управления пуском и остановкой асинхронного короткозамкнутого двигателя

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.

#### 5.4. Реверсивное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем

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. 5.3).

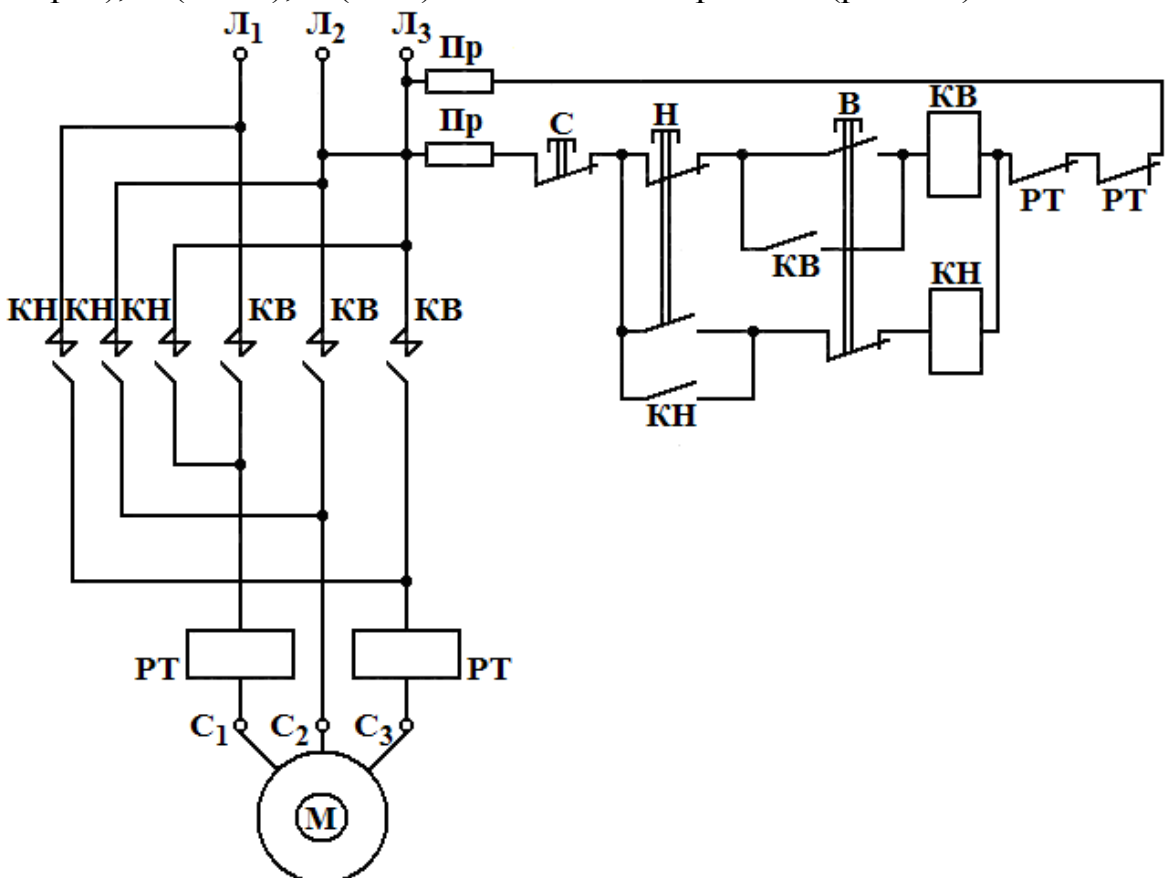


Рис. 5.3. Схема реверсивного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем

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.

## 5.5. 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. 5.4).

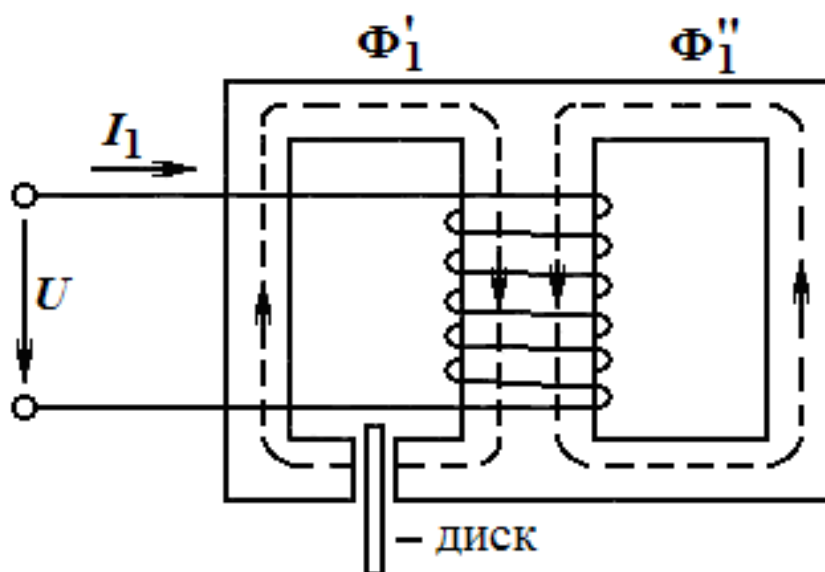


Рис. 5.4. Первый электромагнит счетчика

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.

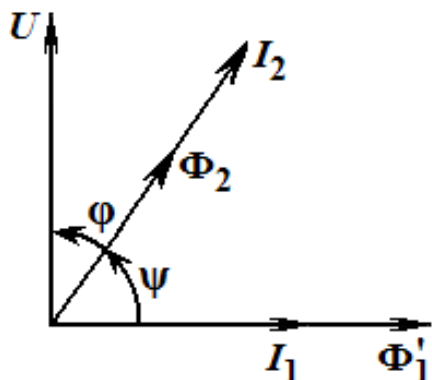


Рис. 5.5. Векторная диаграмма для первого электромагнита

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. 5.5).

Второй электромагнит имеет железный сердечник П-образной формы, на котором располагается катушка, состоящая из небольшого числа витков проводника большого сечения (рис. 5.6). 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.

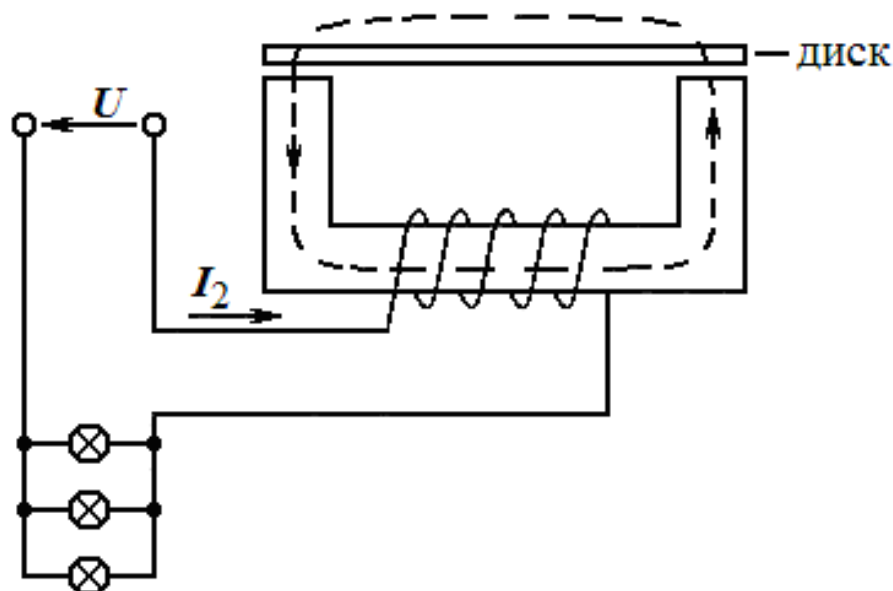


Рис. 5.6. Второй электромагнит счетчика

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.  $M_{вр} = M_{пр}$  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?

## 6. 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. 6.1):

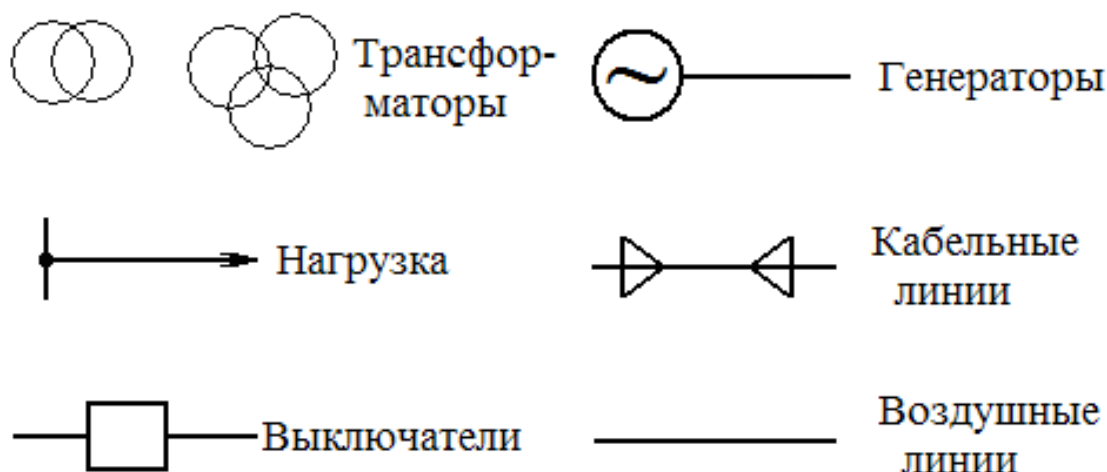


Рис. 6.1. Условные электрические изображения элементов электрических систем и сетей

Примерная схема простой электроэнергетической системы приведена на рис. 6.2. Здесь электрическая энергия, вырабатываемая на 2-х электростанциях различных типов: тепловой электростанции (ТЭС) и теплоэлектростанции (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.

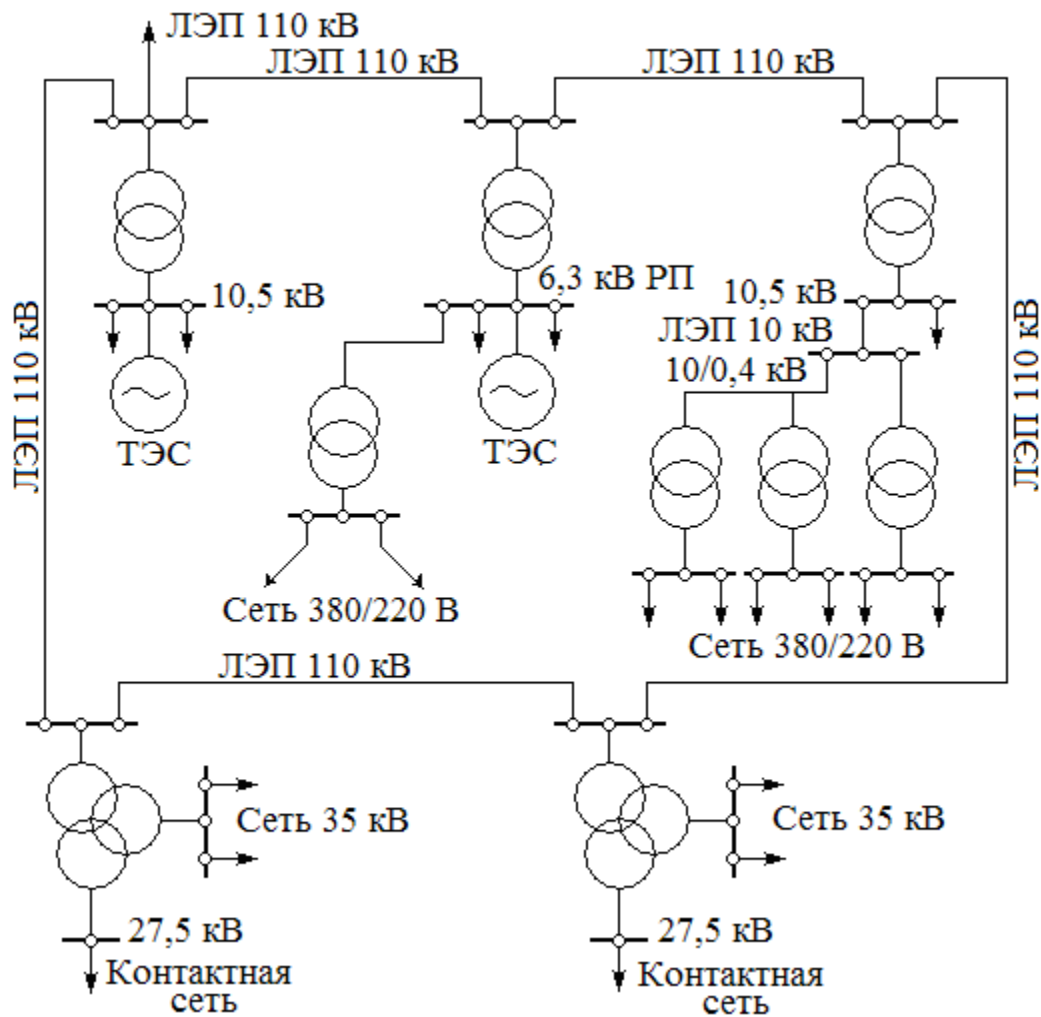


Рис. 6.2. Схема простой электроэнергетической системы

### 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

$$\Delta U_* = \frac{2I_p}{\gamma S} 100,$$

где  $l$  – длина провода;

$\gamma$  – удельная проводимость материала провода (для меди

$$\gamma = 54 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2});$$

$S$  – сечение провода,  $\text{мм}^2$ ;

$I_p$  – рабочий ток нагрузки.

Тогда сечение провода определяется формулой

$$S = \frac{2I_p}{\gamma \Delta U_*}. \quad (6.3.1)$$

## 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. 6.3, 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.

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.

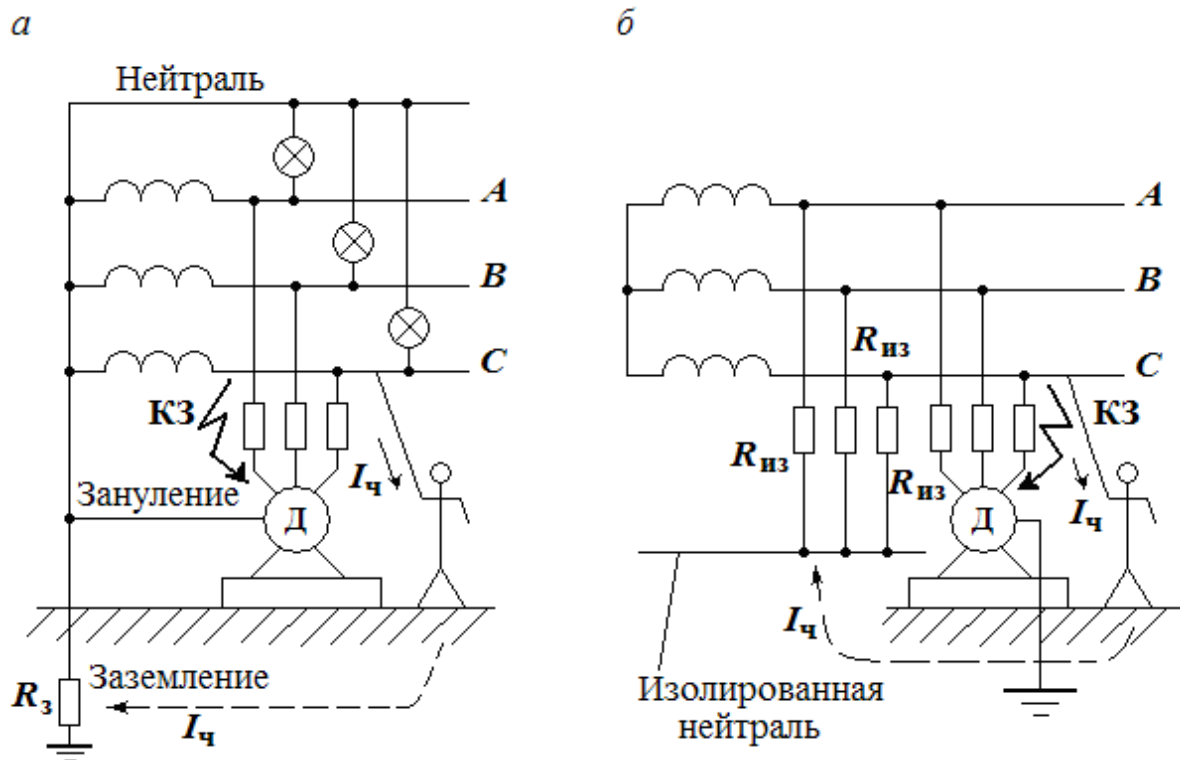


Рис. 6.3. Схемы подключения нейтрали к заземлителю:  
 а – непосредственно или через малые сопротивления;  
 б – с помощью создания изолированной нейтрали

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. 6.3, 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  $I_{\text{доп}} \geq K_0 I_{\text{вст}}$ , где  $K_0$  – 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) действии 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  $t_{\text{заш}}$  и время отключения выключателя  $t_{\text{ов}}$ :  $t_{\text{к}} = t_{\text{заш}} + t_{\text{ов}}$ . Мерой количества выделенной теплоты за время  $t_{\text{к}}$  является тепловой импульс:

$$W_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{к}}} I_{\text{к}}^2 dt.$$

### 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  $\Delta U_* = 5\%$ .

Р е ш е н и е

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

$$I_{\text{р}} = \frac{P}{U}.$$

Для установки из шести прожекторов рабочий ток нагрузки равен:

$$I_{\text{р}} = \frac{6P}{U} = \frac{6 \cdot 1000}{220} = 27,2 \text{ А.}$$

Определим сечение жилы кабеля, исходя из формулы (6.3.1):

$$S = \frac{2I_{\text{р}}}{\gamma \Delta U} = \frac{2 \cdot 85 \cdot 27,2}{54 \cdot 11} = 7,8 \text{ мм}^2.$$

По табл. 6.1 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 ( $S = 7,8 \text{ мм}^2$ ), которому соответствует нормированное сечение  $S = 10 \text{ мм}^2$  с допустимым током 70 А.

Т а б л и ц а 6 . 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. 6.2) по механической прочности минимальное сечение должно быть не менее 2,5 мм<sup>2</sup>. Выбранное сечение  $S = 10 \text{ мм}^2$  удовлетворяет данному условию.

Т а б л и ц а 6 . 2

Наименование проводников	Минимальное сечение, мм <sup>2</sup>
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.

Р е ш е н и е .

В нашем случае

$$I_{\text{вст}} \geq 27,2 \text{ А} .$$

По табл. 6.3 для защиты установки можно выбрать предохранитель типа ПР-2 с плавкой вставкой на номинальный ток  $I_{\text{вст}} = 35 \text{ А}$ .

Таблица 6.3

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. 6.4 и принимаем равным 1,25. Следовательно,

$$K_0 = 1,25 \cdot 35 = 43,75 \text{ А.}$$

Таблица 6.4

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. 6.5.

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 ненамного лучше.

Т а б л и ц а 6 . 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. 6.6.



Таблица 6.6

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

Примечание. ТП – трансформаторная подстанция; РУ – распределительное устройство; КТП – комплексная трансформаторная подстанция; КРУ – комплексное распределительное устройство; ВЛ – воздушные линии.

Из анализа данных (см. табл. 6.6) 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. 6.4). 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



Рис. 6.4. График частоты электротравм в зависимости от возраста электриков

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).

Максимум травм приходится на электриков со стажем свыше 10 лет (рис. 6.5) и с IV квалификационной группой по технике безопасности (рис. 6.6).

Высокий травматизм у квалифицированных опытных работни-

ков 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.

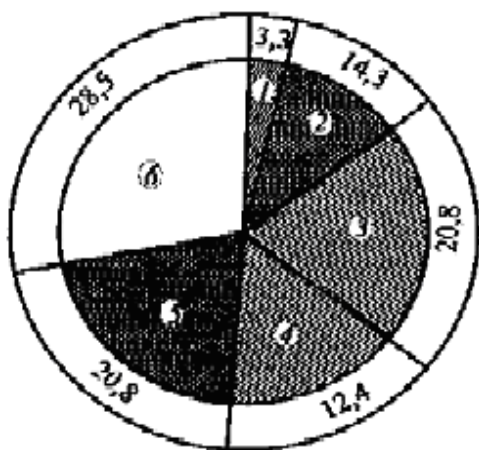


Рис. 6.5. Производственный электротравматизм у работников с различным стажем, %:  
 1 – до 1 мес.; 2 – свыше 1 мес. до 1 года; 3 – свыше 1 года до 3-х лет; 4 – свыше 3 лет до 5; 5 – свыше 5 лет до 10 лет; 6 – свыше 10 лет

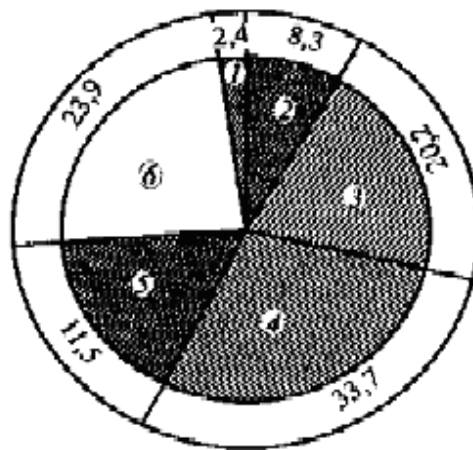


Рис. 6.6. Производственный электротравматизм у электротехнического персонала с различными группами по ТБ, %:  
 1–5 – соответственно I–V группы; 6 – группа не присвоена

## 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 электро-сварки).

*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 работающем 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. 6.7), 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. 6.8) «рука – рука» (рис. 6.9), 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.

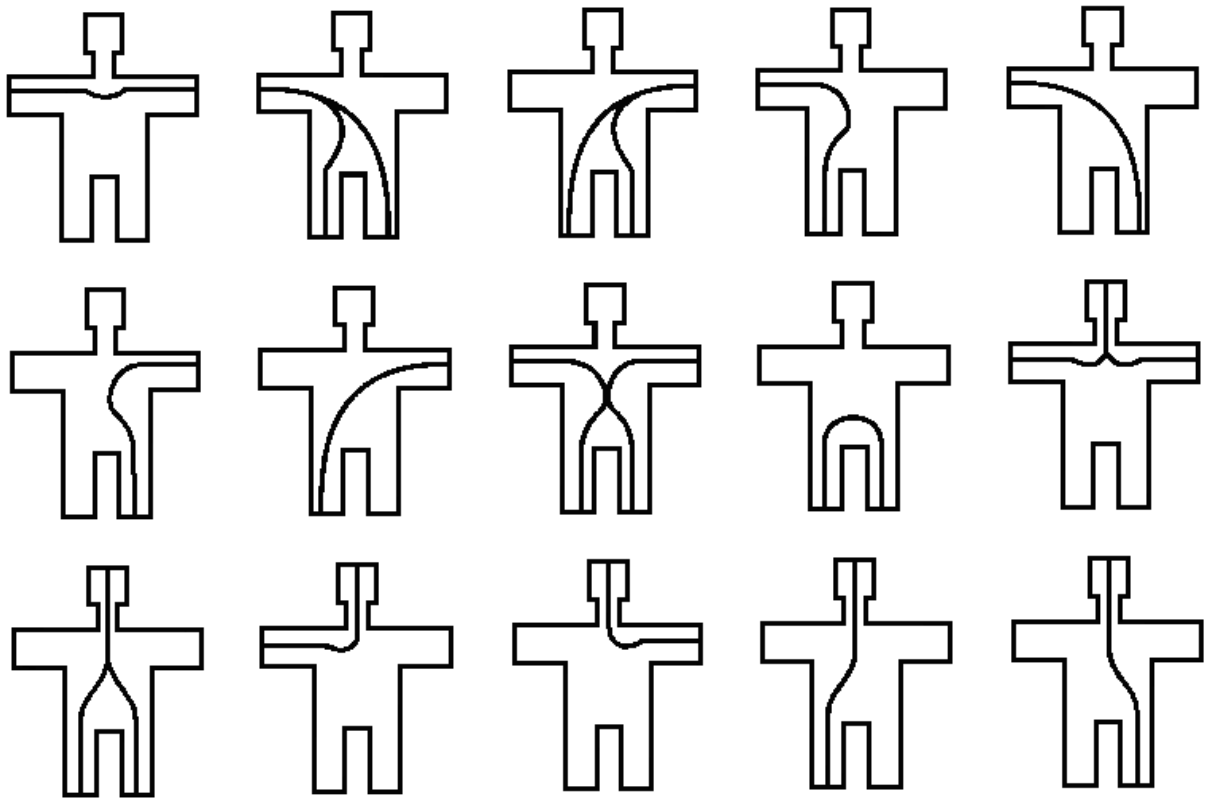


Рис. 6.7. Путь тока в человеке при поражении током

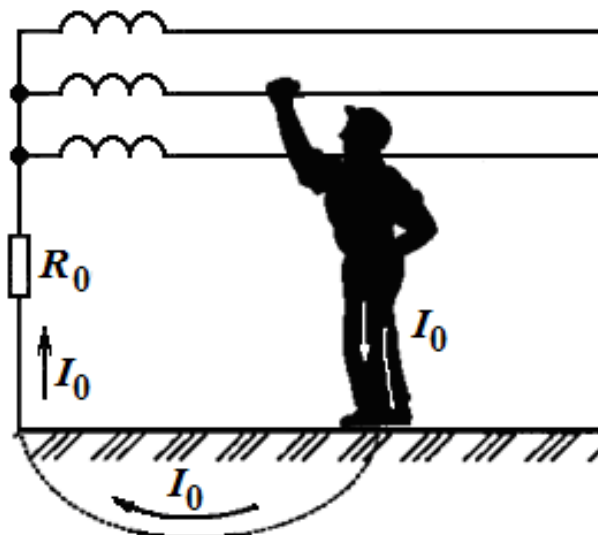


Рис. 6.8. Прикосновение человека к одной фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью

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.

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.

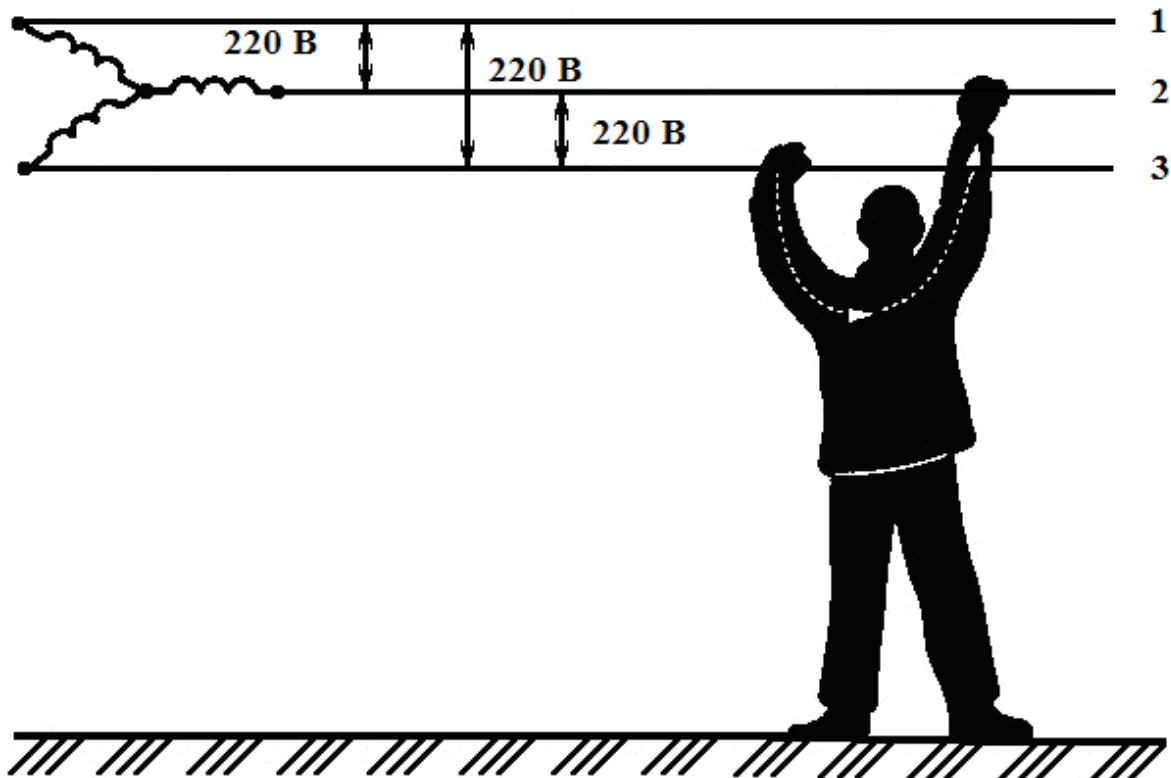


Рис. 6.9. Прикосновение человека к двум проводам трёхфазной сети с линейным напряжением 220 В с изолированной нейтралью:  
1, 2, 3 – фазные провода

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. 6.7), 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.

Таблица 6.7

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. 6.8).

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.

Т а б л и ц а 6 . 8

Материал	Кислота									Хлор	Щелочь	Ам-миак
	соляная		азотная		серная		плавиковая	уксусная				
	Я-0-Я 5%	Я-0-Я 50%	Я-0-Я 5%	Я-0-Я 50%	Я-0-Я 5%	Я-0-Я 50%		Я-0-Я 5%	Я-0-Я 50%			
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.

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?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немцов, М.В. Электротехника и электроника [Текст]: учебник / М.В. Немцов. – М.: Изд. 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. Основы теории, расчета линейных электрических цепей и электроснабжения объектов [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2012.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. Электромагнитные устройства и трансформаторы.....	6
2. Электрические машины постоянного тока .....	28
3. Асинхронные электрические машины .....	38
4. Синхронные электрические машины .....	57
5. Электропривод и счетчик электрической энергии.....	61
6. Электроснабжение объектов .....	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	91

Учебное издание

Пинт Эдуард Михайлович  
Фролов Геннадий Васильевич  
Петровнина Ирина Николаевна  
Романенко Игорь Иванович

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Учебное пособие

Редактор                      М.А. Сухова  
Верстка                        Н.В. Кучина

---

Подписано в печать 16.04.2015.      Формат 60x84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 5,35.      Уч.-изд.л. 5,75.      Тираж 80 экз.  
Заказ № 133.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.

