

М. М. КАЦМАН

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» в качестве  
учебника для использования в учебном процессе образовательных  
учреждений, реализующих ФГОС СПО по группе специальностей  
140400 «Электроэнергетика и электротехника»*

*Регистрационный номер рецензии № 499  
от 14 декабря 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*

12-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2013

УДК 621.313(075.32)  
ББК 31.26я723  
К307

Рецензент:

*Е. П. Рудобаба* (Московский вечерний электромеханический техникум им. Л. Б. Красина)

**Кацман М. М.**

К307 Электрические машины : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. — 12-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 496 с.

ISBN 978-5-7695-9705-3

В учебнике рассматриваются теория, принцип действия, устройство и анализ режимов работы электрических машин и трансформаторов как общего, так и специального назначения, получивших распространение в различных отраслях техники.

Учебник может быть использован при освоении профессионального модуля ПМ.01. «Организация технического обслуживания и ремонта электрического и электромеханического оборудования» (МДК.01.01) по специальности 140448 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезен студентам вузов.

УДК 621.313(075.32)  
ББК 31.26я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© М. М. Кацман, 2006  
© Т. И. Светова, наследница Кацмана М. М., 2011  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-9705-3

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник написан в соответствии с учебными программами предмета «Электрические машины» для специальностей «Электрические машины и аппараты», «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» и «Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт электрического и электромеханического оборудования» средних профессиональных учебных заведений.

Книга содержит основы теории, описание конструкций и анализ эксплуатационных свойств трансформаторов и электрических машин. Кроме того, в ней приведены примеры решения задач, что безусловно будет способствовать лучшему пониманию изучаемых вопросов.

В учебнике принят следующий порядок изложения материала: трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, коллекторные машины. Такая последовательность изучения облегчает усвоение курса и наиболее полно отвечает современному состоянию и тенденциям развития электромашиностроения. Наряду с электрическими машинами общего назначения в учебнике рассмотрены некоторые виды трансформаторов и электрических машин специального назначения, приведены сведения по техническому уровню современных серий электрических машин с описанием особенностей их конструктивного исполнения.

Основное внимание в учебнике уделено раскрытию физической сущности явлений и процессов, определяющих работу рассматриваемых устройств.

Принятая в книге методика изложения материала основана на многолетнем опыте преподавания предмета «Электрические машины».

# ВВЕДЕНИЕ

## В.1. Назначение электрических машин и трансформаторов

Электрификация — это широкое внедрение в промышленность, сельское хозяйство, транспорт и быт электрической энергии, вырабатываемой на мощных электростанциях, объединенных высоковольтными электрическими сетями в энергетические системы.

Электрификация осуществляется посредством устройств, производимых электротехнической промышленностью. Основной отраслью этой промышленности является **электромашиностроение**, занимающееся разработкой и изготовлением электрических машин и трансформаторов.

*Электрическая машина* представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергий. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами — генераторами, преобразующими механическую энергию в электрическую.

Основная часть электроэнергии (до 80 %) вырабатывается на тепловых электростанциях, где при сжигании химического топлива (уголь, торф, газ) вода нагревается и переводится в пар высокого давления. Последний подается в паровую турбину, где, расширяясь, приводит ротор турбины во вращение (тепловая энергия в турбине преобразуется в механическую). Вращение ротора турбины передается на вал генератора (турбогенератора). В результате электромагнитных процессов, происходящих в генераторе, механическая энергия преобразуется в электрическую.

Процесс производства электроэнергии на атомных электростанциях аналогичен процессу на тепловой электростанции, с той лишь разницей, что вместо химического топлива там используется ядерное.

На гидравлических электростанциях процесс выработки электроэнергии состоит в следующем: вода, поднятая плотиной на определенный уровень, сбрасывается на рабочее колесо гидротурбины; получаемая при этом механическая энергия путем вращения колеса турбины передается на вал электрического генератора (гидрогенератора), в котором механическая энергия преобразуется в электрическую энергию.

В процессе потребления электрической энергии происходит ее преобразование в другие виды энергий (тепловую, механическую, химическую). Около 70 % электроэнергии используется для приведения в движение станков, механизмов, транспортных средств, т. е. для пре-

образования ее в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электрическими машинами — *электродвигателями*.

Электродвигатель — основной элемент *электропривода* рабочих машин. Хорошая управляемость электрической энергии, простота ее распределения позволили широко применить в промышленности многодвигательный электропривод рабочих машин, когда отдельные звенья рабочей машины приводятся в движение собственными двигателями. Многодвигательный привод значительно упрощает механизм рабочей машины (уменьшается число механических передач, связывающих отдельные звенья машины) и создает большие возможности в автоматизации различных технологических процессов. Электродвигатели широко используют на транспорте в качестве тяговых двигателей, приводящих во вращение колесные пары электровазов, электропоездов, троллейбусов и др.

За последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности — микромашин мощностью от долей до нескольких сотен ватт. Такие электрические машины используют в приборных устройствах, средствах автоматизации и бытовой техники — пылесосах, холодильниках, вентиляторах и др. Мощность этих двигателей невелика, конструкция проста и надежна, и изготовляют их в больших количествах.

Электрическую энергию, вырабатываемую на электростанциях, необходимо передать в места ее потребления, прежде всего в крупные промышленные центры страны, которые удалены от мощных электростанций на многие сотни, а иногда и тысячи километров. Но электроэнергию недостаточно передать. Ее необходимо распределить среди множества разнообразных потребителей — промышленных предприятий, жилых зданий и т. д. Передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют при высоком напряжении (до 500 кВ и более), чем обеспечиваются минимальные электрические потери в линиях электропередачи. Поэтому в процессе передачи и распределения электрической энергии приходится неоднократно повышать и понижать напряжение. Этот процесс выполняется посредством электромагнитных устройств, называемых *трансформаторами*. Трансформатор не является электрической машиной, так как его работа не связана с преобразованием электрической энергии в механическую или наоборот. Трансформаторы преобразуют лишь напряжение электрической энергии. Кроме того, трансформатор — это статическое устройство, и в нем нет никаких движущихся частей. Однако электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторах, аналогичны процессам, происходящим при работе электрических машин. Более того, электрическим машинам и трансформаторам свойственна единая природа электромагнитных и энергетических процессов, возникающих при взаимодействии магнитного поля и проводника с током. По этим причинам трансформаторы составляют неотъемлемую часть курса электрических машин.

Теоретические основы работы электрических машин были заложены в 1821 г. М. Фарадеем, установившим возможность преобразования электрической энергии в механическую и создавшим первую модель электродвигателя. Важную роль в развитии электрических машин имели работы ученых Д. Максвелла и Э. Х. Ленца. Идея взаимного преобразования электрической и механической энергий получила дальнейшее развитие в работах выдающихся русских ученых Б. С. Якоби и М. О. Доливо-Добровольского, которыми были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, пригодные для практического использования.

Большие заслуги в создании трансформаторов и их практическом применении принадлежат замечательному русскому изобретателю П. Н. Яблочкову. В начале XX столетия были созданы почти все основные виды электрических машин и трансформаторов и разработаны основы их теории.

В настоящее время отечественное электромашиностроение достигло значительных успехов. Дальнейший технический прогресс определяет в качестве основной задачи практическое внедрение достижений электротехники в реальные разработки устройств электропривода для промышленных устройств и изделий бытовой техники. Главная задача научно-технического прогресса состоит в техническом перевооружении и реконструкции производства. Значительная роль в решении этой задачи отводится электрификации. При этом необходимо учитывать возрастающие экологические требования к источникам электроэнергии и наряду с традиционными необходимо развивать экологически чистые (альтернативные) способы производства электроэнергии с использованием энергии солнца, ветра, морских приливов, термальных источников.

В условиях научно-технического развития большое значение приобретают работы, связанные с повышением качества выпускаемых электрических машин и трансформаторов. Решение этой задачи является важным средством развития международного экономического сотрудничества. Соответствующие научные учреждения и промышленные предприятия России ведут работы по созданию новых видов электрических машин и трансформаторов, удовлетворяющих современным требованиям к качеству и технико-экономическим показателям выпускаемой продукции.

## **В.2. Электрические машины — электромеханические преобразователи энергии**

Изучение электрических машин основано на знаниях физической сущности электрических и магнитных явлений, излагаемых в курсе «Теоретические основы электротехники». Поэтому, прежде

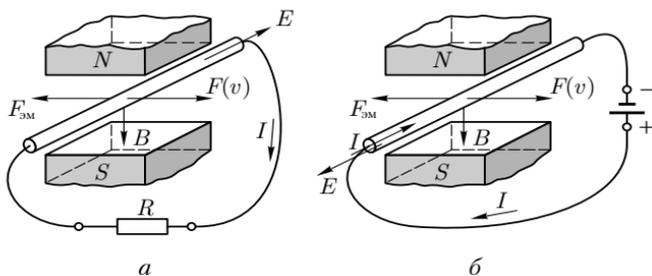


Рис. В.1. К понятиям об «элементарном генераторе» (а) и «элементарном двигателе» (б)

чем приступить к изучению курса «Электрические машины», вспомним физический смысл некоторых законов и явлений, лежащих в основе принципа действия электрических машин, в первую очередь закона электромагнитной индукции.

В процессе работы электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую. В основе этого процесса лежит закон электромагнитной индукции: если внешней силой  $F$  воздействовать на помещенный в магнитное поле проводник и перемещать его (рис. В.1, а), например, слева направо перпендикулярно вектору индукции  $B$  магнитного поля со скоростью  $v$ , то в проводнике будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС)

$$E = Blv, \tag{В.1}$$

где  $B$  — магнитная индукция, Тл;  $l$  — активная длина проводника, т. е. длина его части, находящейся в магнитном поле, м;  $v$  — скорость движения проводника, м/с.

Для определения направления ЭДС следует воспользоваться правилом «правой руки» (рис. В.2, а). Применив это правило, определим направление ЭДС в проводнике («от нас»). Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление  $R$  (потребитель), то под действием ЭДС  $E$  в проводнике возникнет ток такого же направления. Таким образом, проводник в магнитном поле можно рассматривать в этом случае как *элементарный генератор*, в котором механическая энергия затрачивается на перемещение проводника со скоростью  $v$ .

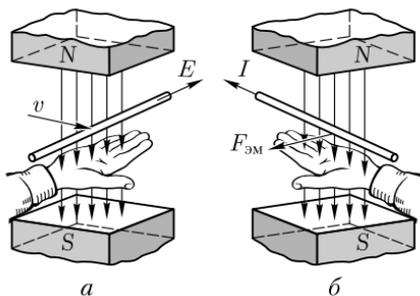


Рис. В.2. Правила «правой руки» (а) и «левой руки» (б)

В результате взаимодействия тока  $I$  с магнитным полем возникает действующая на проводник электромагнитная сила

$$F_{\text{эм}} = BlI. \quad (\text{B.2})$$

Направление силы  $F_{\text{эм}}$  можно определить по правилу «левой руки» (рис. В.2, б). В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево, т. е. противоположно движению проводника. Таким образом, в рассматриваемом элементарном генераторе сила  $F_{\text{эм}}$  является тормозящей по отношению к движущей силе  $F$ . При равномерном движении проводника эти силы равны, т. е.  $F = F_{\text{эм}}$ . Умножив обе части равенства на скорость движения проводника  $v$ , получим

$$Fv = F_{\text{эм}}v.$$

Подставив в это выражение значение  $F_{\text{эм}}$  из (В.2), получим

$$Fv = BlIv = EI. \quad (\text{B.3})$$

Левая часть равенства (В.3) определяет значение механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле; правая часть — значение электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре электрическим током  $I$ . Знак равенства между этими частями еще раз подтверждает, что в генераторе механическая мощность  $Fv$ , затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую мощность  $EI$ .

Если внешнюю силу  $F$  к проводнику не прикладывать, а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение  $U$  так, чтобы ток  $I$  в проводнике имел направление, указанное на рис. В.1, б, то на проводник будет действовать только электромагнитная сила  $F_{\text{эм}}$ . Под действием этой силы проводник начнет двигаться в магнитном поле. При этом в проводнике будет индуцироваться ЭДС с направлением, противоположным напряжению  $U$ . Таким образом, часть напряжения  $U$ , приложенного к проводнику, уравнивается ЭДС  $E$ , наведенной в этом проводнике, а другая часть составляет падение напряжения в проводнике:

$$U = E + Ir, \quad (\text{B.4})$$

где  $r$  — электрическое сопротивление проводника.

Умножив обе части равенства на ток  $I$ , получим

$$UI = EI + I^2r.$$

Подставляя вместо  $E$  значение ЭДС из (В.1), получим

$$UI = BlvI + I^2r,$$

или, учитывая (В.2), получим

$$UI = F_{\text{эм}}v + I^2r. \quad (\text{B.5})$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность ( $UI$ ), поступающая в проводник из сети, частично преобразуется в механическую ( $F_{\text{эм}}v$ ), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике ( $I^2r$ ). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитном поле, можно рассматривать как *элементарный электродвигатель*.

Описанные явления позволяют сделать вывод:

а) для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения;

б) при работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя одновременно наблюдаются индуцированное ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, и возникновение механической силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при прохождении по нему электрического тока;

в) взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом направлении, т. е. одна и та же электрическая машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора; это свойство электрических машин называют *обратимостью*.

Рассмотренные «элементарные» электрические генератор и двигатель отражают лишь принцип использования в них основных законов и явлений электрического тока. Что же касается конструктивного исполнения, то большинство электрических машин построено на принципе вращательного движения их подвижной части. Несмотря на большое разнообразие конструкций электрических машин, оказывается возможным представить себе некоторую обобщенную конструкцию электрической машины. Такая конструкция (рис. В.3) состоит из неподвижной части 1, называемой *статором*, и вращающейся части 2, называемой *ротором*. Ротор располагается в расточке статора и отделен от него воздушным зазором. Одна из указанных частей машины снабжена элементами, возбуждающими в машине магнитное поле (например, электромагнит или постоянный магнит), а другая — имеет обмотку, которую будем условно называть *рабочей обмоткой машины*. Как неподвижная часть машины (статор), так и подвижная (ротор) имеют сердечники, выполненные из магнитно-мягкого материала и обладающие небольшим магнитным сопротивлением.

Если электрическая машина работает в режиме генератора, то

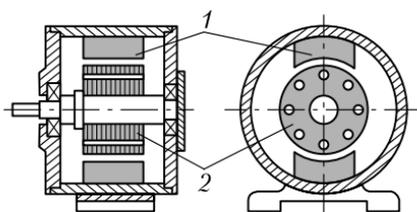


Рис. В.3. Обобщенная конструктивная схема электрической машины

при вращении ротора (под действием приводного двигателя) в проводниках рабочей обмотки наводится ЭДС и при подключении потребителя появляется электрический ток. При этом механическая энергия приводного двигателя преобразуется в электрическую. Если машина предназначена для работы в качестве электродвигателя, то рабочая обмотка машины подключается к сети. При этом ток, возникший в проводниках этой обмотки, взаимодействует с магнитным полем и на роторе возникают электромагнитные силы, приводящие ротор во вращение. При этом электрическая энергия, потребляемая двигателем из сети, преобразуется в механическую энергию, затрачиваемую на приведение в действие какого-либо механизма, станка, транспортного средства и т. п.

Возможны также конструкции электрических машин, у которых рабочая обмотка расположена на статоре, а элементы, возбуждающие магнитное поле, — на роторе. Принцип работы машины при этом остается прежним.

Диапазон мощностей электрических машин весьма широк — от долей ватта до сотен тысяч киловатт.

### **В.3. Классификация электрических машин**

Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным назначением, так как связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий. Однако применение электрических машин в различных отраслях техники может иметь и другие цели. Так, потребление электроэнергии часто связано с преобразованием переменного тока в постоянный или же с преобразованием тока промышленной частоты в ток более высокой частоты. Для этих целей применяют *электромашинные преобразователи*.

Электрические машины используют также для усиления мощности электрических сигналов. Такие электрические машины называют *электромашинными усилителями*. Электрические машины, используемые для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии, называют *синхронными компенсаторами*. Электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока, называют *индукционными регуляторами*.

Очень разнообразно применение *микромашин* в устройствах автоматизации. Здесь электрические машины используют не только в качестве двигателей, но и в качестве *тахогенераторов* (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал), *сельсинов*, *вращающихся трансформаторов* (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т. п. Из приведенных примеров видно, сколь разнообразны электрические машины по назначению.



Рис. В.4. Классификация электрических машин

Рассмотрим классификацию электрических машин по принципу действия, согласно которой все электрические машины подразделяют на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией. Бесколлекторные машины — это машины переменного тока. Их делят на асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяют преимущественно в качестве двигателей, а синхронные — как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов. Коллекторные машины используют главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока.

Электрические машины одного принципа действия могут различаться схемами включения либо другими признаками, влияющими на эксплуатационные свойства этих машин. Например, асинхронные и синхронные машины могут быть трехфазными (включаемыми в трехфазную сеть) или однофазными. Асинхронные машины в зависимости от конструкции обмотки ротора разделяют на машины с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Син-

хронные и коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания в них магнитного поля возбуждения разделяют на машины с обмоткой возбуждения и машины с постоянными магнитами. На рис. В.4 представлена диаграмма классификации электрических машин, содержащая основные их виды, получившие наибольшее применение в современном электроприводе. Эта же классификация положена в основу изучения курса «Электрические машины».

Данный курс помимо собственно электрических машин предусматривает изучение трансформаторов. Трансформаторы являются статическими преобразователями электроэнергии переменного тока. Отсутствие каких-либо вращающихся частей придает трансформаторам конструкцию, принципиально отличающую их от электрических машин. Однако принцип действия трансформаторов, так же как и электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции, и поэтому многие положения теории трансформаторов составляют основу теории электрических машин переменного тока.

Электрические машины и трансформаторы — основные элементы любой энергетической системы или установки, поэтому для специалистов, работающих в сфере производства или эксплуатации электрических машин, необходимы знания теории и понимание физической сущности электромагнитных, механических и тепловых процессов, протекающих в электрических машинах и трансформаторах при их работе.

Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электроэнергии. Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется при высоком напряжении (до 500 кВ и более), благодаря чему значительно уменьшаются электрические потери в линии электропередачи. Получить такое высокое напряжение в генераторе невозможно, поэтому электроэнергия после генератора подается на повышающий трансформатор, в котором напряжение увеличивается до требуемого значения. Это напряжение должно быть тем выше, чем больше протяженность линии электропередачи и чем больше передаваемая по этой линии мощность. Например, при передаче электроэнергии мощностью  $10^6$  кВт на расстояние 1000 км необходимо напряжение 500 кВ. В местах распределения электроэнергии между потребителями устанавливают понижающие трансформаторы, которые понижают напряжение до требуемого значения. И наконец, в местах потребления электроэнергии напряжение еще раз понижают посредством трансформаторов до 220, 380 или 660 В. При таком напряжении электроэнергия подается непосредственно потребителям — на рабочие места предприятий и в жилые помещения.

Таким образом, электроэнергия переменного тока в процессе передачи от электростанции к потребителям подвергается трех-, а иногда и четырехкратному трансформированию. Помимо этого основного применения трансформаторы используются в различных электроустановках — в электроприводе, нагревательных печах и т. п.

## Глава 1

### РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАТОРА

#### 1.1. Назначение и области применения трансформаторов

*Трансформатором* называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления

электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, формой графика напряжения (тока), частотой. Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма графика напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

Трансформаторы разделяют на силовые трансформаторы общего назначения и трансформаторы специального назначения. Силовые трансформаторы общего назначения применяют в линиях передачи и распределения электроэнергии, а также в различных электроустройствах для получения требуемого напряжения. Трансформаторы специального назначения характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного исполнения. К этим трансформаторам относятся печные и сварочные трансформаторы для устройств автоматики (пик-трансформаторы, импульсные, умножители частоты и т. п.), испытательные, измерительные и т. п.

При изучении данного раздела будем иметь в виду силовые трансформаторы общего назначения, за исключением гл. 5, в которой рассмотрены некоторые виды трансформаторов специального назначения.

## 1.2. Принцип действия трансформаторов

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 1.1, а). Одна из обмоток, которую называют *первичной*, присоединена к источнику переменного тока  $G$  (генератору) на напряжение  $U_1$ . К другой об-

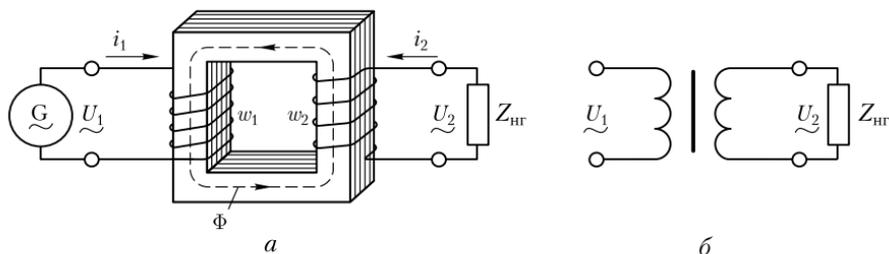


Рис. 1.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

мотке, называемой *вторичной*, подключен потребитель  $Z_{\text{нп}}$ . Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток  $i_1$ , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС: в первичной обмотке — ЭДС *самоиндукции*

$$e_1 = -w_1 (d\Phi / dt), \quad (1.1)$$

во вторичной обмотке — ЭДС *взаимоиндукции*

$$e_2 = -w_2 (d\Phi / dt), \quad (1.2)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки  $Z_{\text{нп}}$  к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС  $e_2$  в цепи этой обмотки создается ток  $i_2$ , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение  $U_2$ . В повышающих трансформаторах  $U_2 > U_1$ , а в понижающих  $U_2 < U_1$ .

Из (1.1) и (1.2) видно, что ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков  $w_1$  и  $w_2$  в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор практически на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

На рис. 1.1, б показано условное изображение однофазного трансформатора на принципиальных электрических схемах.

Трансформаторы обладают свойством *обратимости*: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению [ $(d\Phi/dt) = 0$ ],

поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

по назначению — силовые общего и специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т. д.;

по виду охлаждения — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением (см. 1.3);

по числу трансформируемых фаз — однофазные и трехфазные;

по форме магнитопровода — стержневые, броневого, бронестержневые, тороидальные;

по числу обмоток на фазу — двухобмоточные, многообмоточные.

### 1.3. Устройство трансформаторов

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с расположенными на его стержнях обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями. Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

**Магнитопровод** в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается

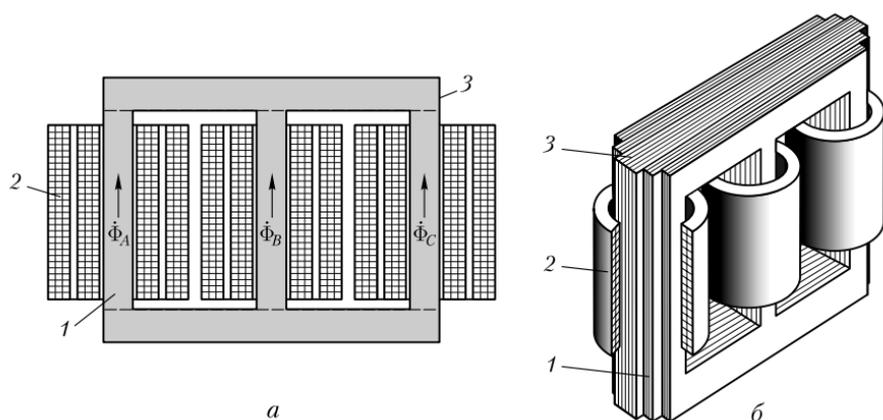
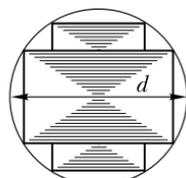


Рис. 1.2. Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

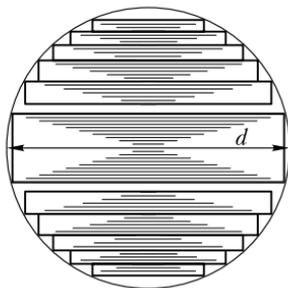
основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он предназначен для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т. е. он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) пластин электротехнической стали, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Силовые трансформаторы выполняют с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневоего и бронестержневого.

В магнитопроводе стержневого типа (рис. 1.2, а) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярмами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях — потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_C$ , а в среднем стержне — поток  $\Phi_B$ . На рис. 1.2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром  $d$  (рис. 1.3). Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее заполнение сталью площади внутри обмотки. Для лучшей теплоотдачи

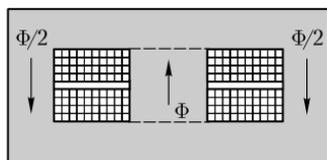


а

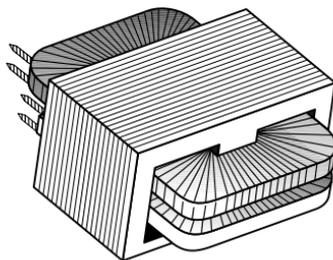


б

Рис. 1.3. Форма сечения стержней трансформаторов: а — малой и средней мощности; б — большой мощности



а



б

Рис. 1.4. Однофазный трансформатор броневоего типа: а — устройство; б — внешний вид

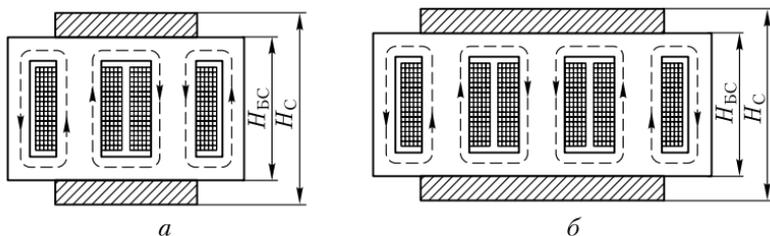


Рис. 1.5. Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов:  
 а — однофазного; б — трехфазного

иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5—6 мм, служащие *вентиляционными каналами*.

Магнитопровод броневое типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рис. 1.4). Магнитный поток в стержне магнитопровода броневое типа в два раза больше, чем в ярах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневое типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы).

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 1.5), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода ( $H_{БС} \ll H_С$ ), а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов.

По способу сочленения стержней с ярами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода (рис. 1.6).

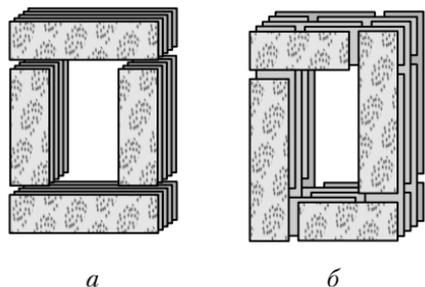


Рис. 1.6. Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкции магнитопроводов

При стыковой конструкции (рис. 1.6, а) стержни и яра собирают раздельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее яра, заранее проложив изолирующие прокладки между стыкующимися элементами, с целью ослабления вихревых токов, возникающих при взаимном перекрытии листов стержней и яра. После установки двух яр всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпилька-

ми. Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

**Ш и х т о в а н н а я** конструкция магнитопроводов силовых трансформаторов показана на рис. 1.6, б, когда стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слой содержит 2—3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной *текстурированной* электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на  $90^\circ$  появляются «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления этого явления применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка (рис. 1.7, а) получают косой стык (рис. 1.7, б), у которого «зона несовпадения» гораздо меньше.

Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

Стержни магнитопроводов во избежание распушения опрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандажа из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм 3 и мест их сочленения со стержнями 1 используют ярмовые балки 2, которые в местах, выходящих за крайние стержни (рис. 1.8), стягивают шпильками.

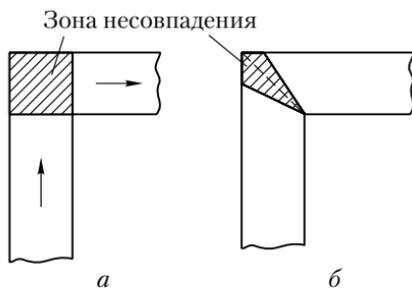


Рис. 1.7. «Зоны несовпадения» при прямом (а) и косом (б) стыках

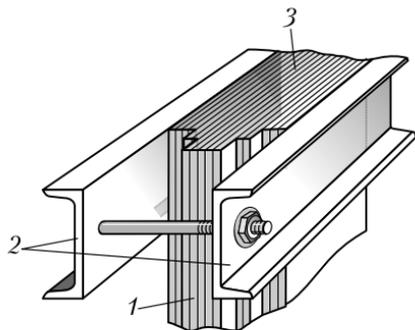


Рис. 1.8. Опрессовка ярма

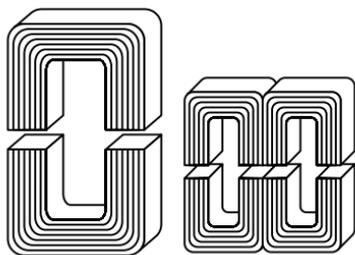


Рис. 1.9. Ленточные разрезные магнитопроводы

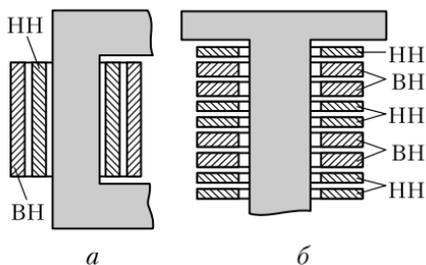


Рис. 1.10. Концентрическая (а) и дисковая (б) обмотки трансформаторов

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления **обязательно заземляют**. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более  $1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными (рис. 1.9), а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

**Обмотки** трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки в большинстве случаев является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т. п.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на концентрические и чередующиеся.

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи — обмотку ВН (рис. 1.10, а).

Чередующиеся (дисковые) обмотки выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке (рис. 1.10, б). Их применяют крайне редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

Концентрические обмотки по конструкции разделяют на несколько типов.

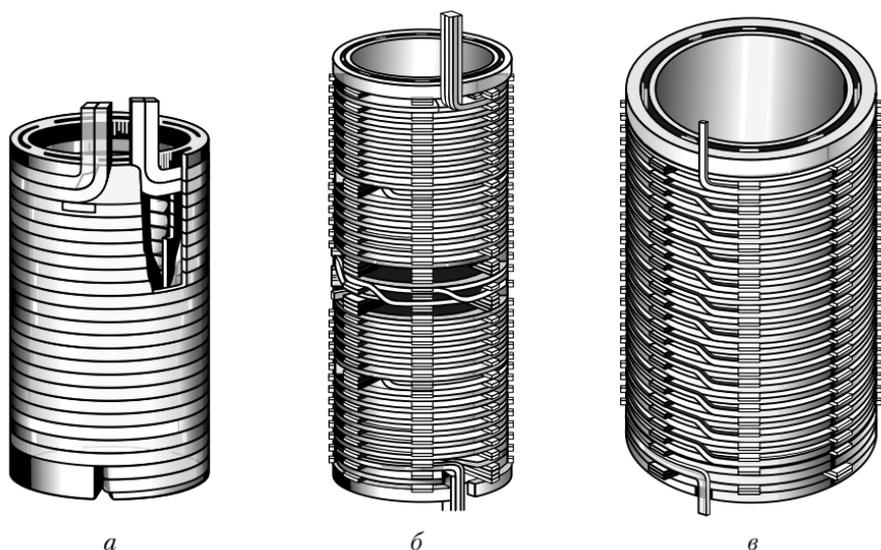


Рис. 1.11. Конструкции концентрических обмоток:  
*a* — цилиндрическая; *б* — винтовая; *в* — непрерывная

1. *Цилиндрические* однослойные или двухслойные обмотки из провода прямоугольного сечения (рис. 1.11, *a*) используют главным образом в качестве обмоток НН на номинальный ток до 800 А.

2. *Винтовые* одно- и многоходовые обмотки выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов (рис. 1.11, *б*). Для того чтобы все параллельные проводники одинаково нагружались током, выполняют *транспозицию* (перекладку) этих проводников. При транспозиции стремятся, чтобы в пределах одного витка каждый проводник занимал все положения. Транспозиция может быть групповой (рис. 1.12, *a*), когда параллельные провода делятся на две группы и перестановка осуществляется группами, и общей, когда меняется взаимное расположение всех параллельных проводов (рис. 1.12, *б*).

3. *Непрерывные обмотки* (рис. 1.11, *в*) состоят из отдельных дисковых обмоток (секций), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, т. е. выполненных «непрерывно». Если обмотка выполняется несколькими параллельными про-

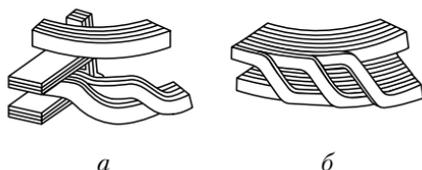


Рис. 1.12. Транспозиция в винтовых обмотках

водами, то в ней применяют транспозицию проводов. Непрерывные обмотки, несмотря на некоторую сложность изготовления, получили наибольшее применение в силовых трансформаторах в качестве обмоток ВН и НН. Это объясняется их большой механической прочностью и надежностью.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рис. 1.13). Трансформаторное масло, омывая обмотки 2 и 3 и магнитопровод 1, отбирает от них теплоту и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака 4 и трубы радиатора 5 отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха. Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и масса масляных транс-

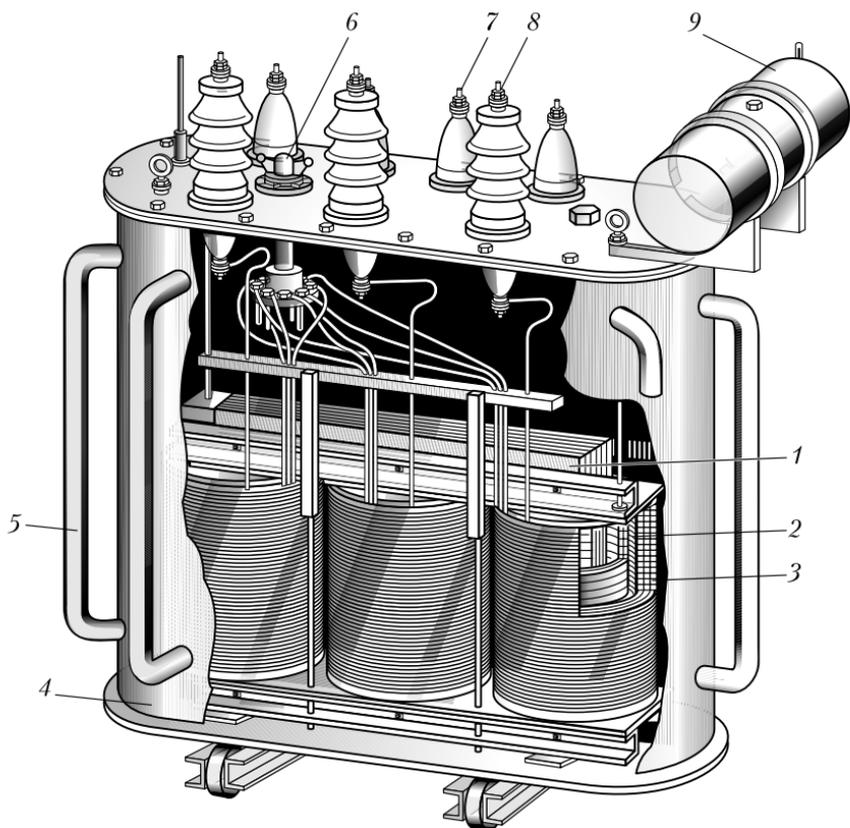


Рис. 1.13. Устройство трансформатора с масляным охлаждением

форматоров меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

В трансформаторах мощностью до 30 кВ · А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или применяют трубчатые баки. Масло, нагреваясь, поднимается вверх, а охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению (см. 5.7).

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель 9, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщающемся с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВ · А и выше снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск ломается и газы выходят наружу.

В трубопровод, соединяющий бак масляного трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами 7 и 8. В масляных трансформаторах для вводов обычно используют проходные фарфоровые изоляторы. Такой ввод снабжен металлическим фланцем, посредством которого он крепится к крышке или стенке бака. К дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений 6 (см. 1.15).

Технические данные трансформатора определяются его *номинальными параметрами*:

- 1) номинальное первичное линейное напряжение  $U_{1\text{ном}}$ , В;
- 2) номинальное вторичное линейное напряжение  $U_{2\text{ном}}$  (напряжение на выводах вторичной обмотки при отключенной нагрузке и номинальном первичном напряжении), В;
- 3) номинальные линейные токи в первичной  $I_{1\text{ном}}$  и вторичной  $I_{2\text{ном}}$  обмотках, А;