

А. В. ГРИЩЕНКО, В. В. СТРЕКОПЫТОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Учебник

Под редакцией д-ра техн. наук, профессора А. В. Грищенко

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования*

Москва



УДК 621.313(075.32)

ББК 31.261я723

Г82

Авторы:

д-р техн. наук, проф. *А. В. Грищенко* — введение, гл. 1—3, 6, 7, 10—12, 15;
д-р техн. наук *В. В. Стрекопытов* — гл. 4, 5, 8, 9, 13—15

Рецензенты:

преподаватель Московского колледжа
железнодорожного транспорта *С. И. Папченков*;
преподаватель Санкт-Петербургского техникума
железнодорожного транспорта *В. И. Бондаренко*

Грищенко А. В.

Г82 Электрические машины и преобразователи подвижного состава: Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 320 с.

ISBN 5-7695-2018-3

Рассмотрены устройство и принцип действия электрических машин постоянного и переменного тока, трансформаторов и аккумуляторов подвижного состава, а также схмотехника статических преобразователей. Описаны параметры конкретных электрических машин подвижного состава и их назначение.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.313(075.32)

ББК 31.261я723

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

© Грищенко А. В., Стрекопытов В. В., 2005

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

ISBN 5-7695-2018-3

Электрические машины, предназначенные для установки на подвижных объектах, должны удовлетворять ряду особых требований и работать в специфических условиях.

Для электропривода объектов подвижного состава используются электрические машины с очень широким диапазоном мощностей (от нескольких десятков ватт до десятков мегаватт).

Частота вращения привода транспортных электрических машин различного назначения находится в пределах 50... 12 000 об/мин. Быстроходность транспортных электрических машин определяется не только спецификой приводимых механизмов, но в значительной мере стремлением уменьшить размеры и массу как самих электрических машин, так и приводимых ими механизмов. При заданных мощности $P_{\text{ном}}$ и частоте вращения $n_{\text{ном}}$ электрические машины должны иметь минимальные габариты, массу, нагрузку на ось, вписываться в габариты подвижного состава и обеспечивать высокую надежность.

Электрические машины подвижного состава работают в тяжелых условиях, резко отличающихся от условий работы стационарных машин. Поэтому необходимо учитывать следующие специфические особенности их эксплуатации.

1. Колебания температуры окружающей среды как при работе, так и при бездействии машины могут составлять от -50 до $+50$ °С при относительной влажности воздуха до (95 ± 3) %. В таких условиях снижается механическая прочность отдельных деталей. При низких температурах изоляционные материалы в большинстве своем становятся хрупкими, в них появляются трещины. Летом (особенно в южных районах) работа электрических машин затруднена из-за ухудшения условий охлаждения, пересыхания изоляции, сильной запыленности. Повышенная влажность воздуха, особенно во время дождя или снега, вызывает коррозию металлических частей и снижает качество изоляции.

2. На корпус машины (особенно на тяговые двигатели) периодически, а иногда постоянно воздействуют импульсы ускорения, превышающие ускорение свободного падения в 10—20 раз. Динамические силы, действующие на детали электрических машин, могут привести к различным повреждениям: обрыву проводов и обмоток, особенно в местах пайки, появлению трещин и разру-

шению электрической изоляции, ускоренному износу осей и подшипников, нарушению нормальной работы упругих элементов.

Конструкция машины и условия размещения ее на подвижном составе должны обеспечивать удобный доступ:

- к подшипникам скольжения с жидкой смазкой, где необходимо контролировать при автономной смазке достаточность подачи масла, а при принудительной смазке — наличие циркуляции масла через подшипники;
- подшипникам качения с консистентной смазкой для частичной замены и пополнения смазки без разборки подшипникового узла;
- щеточному аппарату коллекторов машин постоянного тока или контактными кольцами машин переменного тока;
- болтам, крепящим к станине главные и добавочные полюса машин постоянного тока;
- воздухоохладителям;
- коробкам выводов концов обмоток машин всех родов тока;
- элементам, имеющим большую массу, для возможности использования при обслуживании и ремонте механизированных средств.

В ряде случаев машины устанавливаются и работают на подвижном составе в помещениях ограниченного объема, без циркуляции и обмена воздуха. Такие условия способствуют загрязнению машины угольной пылью щеток, нарушению коммутации и возможности переброса дуги с коллектора на корпус.

Электрические машины, установленные снаружи кузова, при движении обдуваются встречным потоком воздуха, в котором содержатся частицы пыли, обладающие абразивным действием. Они разрушают изоляцию электрических машин, ухудшают работу подшипников и создают токопроводящие цепочки, которые могут вызывать короткие замыкания.

Некоторые из перечисленных условий противоречат основным требованиям, предъявляемым к транспортным электрическим машинам, например: для достижения возможно меньших габаритов активное ядро машины должно работать с высоким коэффициентом использования, что сопровождается высокими рабочими температурами, предельно допустимыми для теплостойкой изоляции. То же относится к механическим напряжениям в элементах конструкции, которые вследствие повышения быстроходности машины достигают высоких, а в ряде случаев предельно допустимых значений.

Создание новых, более совершенных и более надежных машин, а так же их грамотная эксплуатация возможны только в результате глубокого изучения физических процессов, происходящих в работающих машинах аналогичного назначения. К таким процессам относятся изнашивание, релаксация и усталость ме-

таллов, коррозия и эрозия элементов конструкции в результате воздействия движущегося потока жидкости, старение масел и консистентных смазок, термическое старение электрической изоляции, запыление, длительное воздействие различных повторяющихся перегрузок, вибраций и т. п. Все эти процессы становятся заметными лишь после продолжительной работы машины, и достоверную информацию об износе может дать только систематическое изучение опыта эксплуатации оборудования, работающего в реальных условиях подвижных объектов.

На подвижном составе все шире используются статические преобразователи энергии на базе полупроводниковых приборов. Силовая полупроводниковая техника является частью привода электрических машин подвижного состава, поэтому понимание работы этих систем необходимо и техникам-механикам. В системах управления силовыми полупроводниковыми преобразователями используются микропроцессоры. Изучение микропроцессорной техники не входит в объем подготовки специалистов-электромехаников, однако раздел, посвященный этим системам, включен в учебник для ознакомления.

РАЗДЕЛ I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Глава 1

УСТРОЙСТВО И РАБОТА КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Преобразование энергии в электрических машинах

Электрическая машина служит для преобразования:

- подводимой к ней механической энергии в электрическую;
- электрической энергии в механическую;
- электрической энергии в электрическую другого рода тока, другого напряжения или частоты.

Выработка электроэнергии на объектах подвижного состава осуществляется путем преобразования тепловой энергии, полученной при сжигании топлива в двигателе внутреннего сгорания, в механическую энергию вращения коленчатого вала, которая приводит в действие электрическую машину — *генератор*.

Значительная часть потребляемой электрической энергии вновь преобразуется в механическую энергию, необходимую для приведения в действие различных машин, механизмов, станков и подвижного состава. Это преобразование осуществляется при помощи электрических машин, называемых *электрическими двигателями*.

Главным назначением электрических машин является работа в качестве генераторов или двигателей. Для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный и наоборот), напряжения, а также для усиления мощности электрических сигналов используются *электромашинные преобразователи*.

Коллекторная машина — электрическая машина (генератор, двигатель), у которой обмотка якоря (ротора) соединена с коллектором. Коллекторные машины предназначены, в основном, для работы на постоянном токе. Существуют универсальные коллекторные машины небольшой мощности, работающие как на постоянном, так и на переменном токе.

При работе электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую, в соответствии с законом электромагнитной индукции. Сущность этого закона состоит в следующем: если внешняя сила F переме-

щает проводник в магнитном поле со скоростью v , например, слева направо перпендикулярно вектору магнитной индукции B , то в проводнике будет наводиться ЭДС (машина работает в режиме генератора):

$$E = Blv, \quad (1.1)$$

где E — электродвижущая сила, индуцируемая в проводнике, В; B — магнитная индукция, Тл; l — активная длина проводника, т.е. длина его части, находящейся непосредственно в магнитном поле, м.

Формула (1.1) определяет лишь величину ЭДС. Для определения направления ЭДС существует известное из курса физики правило правой руки. Согласно этому правилу на рис. 1.1 ЭДС в проводнике направлена «от нас». Если концы проводника замкнуть на внешнее сопротивление (потребитель), то под действием ЭДС в проводнике потечет ток такого же направления.

Если же по витку пропускать электрический ток I , магнитные поля 2 полюсов N и S и проводника 1 взаимодействуют между собой, вследствие чего возникает электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, действующая на проводник (машина работает в режиме двигателя):

$$F_{\text{эм}} = BIl. \quad (1.2)$$

Направление силы $F_{\text{эм}}$ можно определить по правилу левой руки. В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево. Таким образом, в генераторе электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$ является тормозящей по отношению к движущей силе F . При равномерном движении проводника эти силы уравниваются друг друга, т.е. $F = F_{\text{эм}}$. Умножим обе части этого равенства на скорость движения проводника:

$$Fv = F_{\text{эм}}v. \quad (1.3)$$

Подставив в формулу (1.3) выражение для $F_{\text{эм}}$ из формулы (1.2), получим

$$Fv = BIlv = EI. \quad (1.4)$$

Левая часть равенства (Fv) характеризует величину механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле, а правая часть (EI) — величину электрической мощности, развиваемой

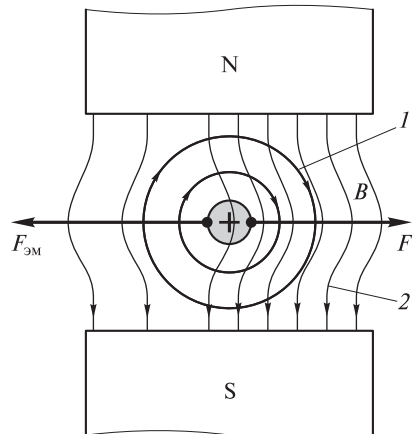


Рис. 1.1. Взаимодействие магнитных полей полюсов и проводника с током:

1 — магнитное поле проводника с током; 2 — основное магнитное поле

в замкнутом контуре электрическим током I . Знак равенства между этими частями показывает, что в генераторе механическая мощность, затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую мощность. Под действием силы $F_{эм}$ проводник перемещается в магнитном поле, и в нем индуцируется ЭДС E . Если к проводнику не прикладывать внешнюю силу F , а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение U , то на проводник будет действовать только электромагнитная сила $F_{эм}$. Под действием этой силы проводник будет перемещаться в магнитном поле. При этом в проводнике индуцируется ЭДС, направленная противоположно приложенному к проводнику напряжению U . Таким образом, часть этого напряжения уравнивается электродвижущей силой E , наведенной в этом проводнике, а другая часть определяет величину падения напряжения в проводнике:

$$U = E + Ir, \quad (1.5)$$

где r — электрическое сопротивление проводника, Ом.

Для определения баланса мощностей умножим обе части выражения (1.5) на ток I :

$$UI = EI + I^2r. \quad (1.6)$$

Подставляя в правую часть равенства (1.6) вместо E выражение для ЭДС из формулы (1.1), получим:

$$UI = BvlI + I^2r. \quad (1.7)$$

Поскольку согласно формуле (1.2) $Bvl = F_{эм}$, то выражение (1.7) можно переписать как

$$UI = F_{эм}v + I^2r. \quad (1.8)$$

Из равенства (1.8) следует, что одна часть электрической мощности (UI), поступающей в проводник, преобразуется в механическую энергию ($F_{эм}v$), а другая идет на покрытие электрических потерь в проводнике (I^2r). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитное поле, можно рассматривать как элементарный электродвигатель.

Рассмотренные процессы преобразования энергии дают возможность сделать весьма важный вывод: необходимым условием работы электрической машины является наличие проводников и магнитного поля. При этом преобразование энергии может происходить в любом направлении, т. е. электрическая машина может работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Такое свойство электрических машин постоянного тока называется *обратимостью*. Это свойство широко используется на локомотивах: тяговые генераторы работают в режиме электродвигателя при запуске дизеля, а тяговые электродвигатели — в режиме генератора при торможении.

1.2. Принцип действия электрической машины постоянного тока

Рассмотрим работу простейшей машины постоянного тока коллекторного типа (рис. 1.2) в режиме генератора. Между двумя полюсами постоянного магнита (N и S) помещена вращающаяся часть машины — *якорь*, который приводится во вращение первичным двигателем, например турбиной или двигателем внутреннего сгорания. Якорь машины состоит из стального цилиндра, на котором расположена обмотка в виде витка *abcd*. Концы витка присоединены к двум пластинам (полукольцам), изолированным друг от друга. Эти пластины образуют важную часть машины — *коллектор*. К щеткам *A* и *B* присоединяется нагрузка генератора. В процессе работы машины коллектор вращается вместе с валом, а щетки *A* и *B* остаются неподвижными.

Предположим, что якорь генератора вращается против часовой стрелки, тогда в проводниках обмотки якоря индуцируется ЭДС, направление которой указано на рисунке стрелками. Мгновенное значение этой ЭДС для одного проводника обмотки определяется по формуле

$$e = Blv. \quad (1.9)$$

Активная длина проводника l в данном случае — величина неизменная, поэтому если скорость движения якоря в процессе работы генератора тоже остается неизменной, то в формуле (1.9) их произведение будет постоянной величиной (const). Это дает возможность записать формулу (1.9) в виде $e = \text{const}B$.

Эта формула показывает, что величина и направление ЭДС в обмотке якоря определяются исключительно величиной и направлением магнитной индукции B в воздушном зазоре между якорем и полюсами.

При вращении якоря генератора проводники его обмотки поочередно занимают положения в магнитном поле с разными значениями магнитной индукции, поэтому в обмотке якоря генератора наводится переменная ЭДС. При этом график изменения ЭДС в зависимости от времени соответствует диаграмме распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. Так, например, при синусоидальном характере распреде-

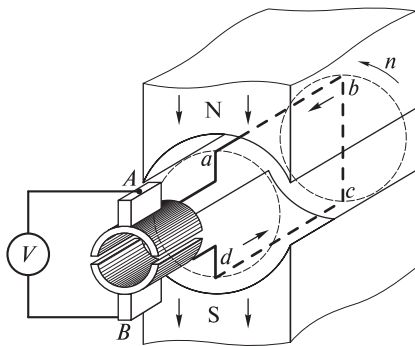


Рис. 1.2. Простейшая машина постоянного тока коллекторного типа:

n — частота вращения якоря

ления магнитной индукции в воздушном зазоре ЭДС, а следовательно, и ток в обмотке якоря также синусоидальны (рис. 1.3). Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи генератора был бы переменным. С помощью коллектора и щеток *A* и *B* переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток, т. е. ток, неизменный по направлению. При изображенном на рис. 1.2 положении витка *abcd* ток внешней цепи генератора направлен от щетки *A* к щетке *B*. Руководствуясь тем, что во внешней части цепи ток направлен от положительного зажима к отрицательному, определяем полярность щеток: щетка *A* имеет полярность «+», а щетка *B* — «-».

После того как якорь повернется на угол $\alpha = 180^\circ$, направление тока в витке *abcd* изменится на обратное. Однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней части цепи остаются неизменными. Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щетками *A* всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под полюсом *N*, а под щеткой *B* — пластина, соединенная с проводником, расположенным над полюсом *S*. Благодаря этому ток во внешней цепи генератора имеет постоянное направление, а его величина остается переменной: когда проводники обмотки *abcd* находятся под серединой полюсов, ток имеет максимальное значение, а когда на геометрической нейтрали — ток равен нулю. Таким образом, с помощью коллектора в генераторе постоянного тока происходит преобразование переменного тока в обмотке якоря в пульсирующий ток во внешнем участке цепи.

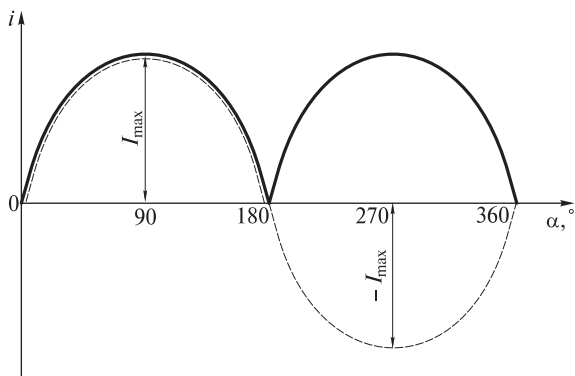


Рис. 1.3. Изменение направления тока в проводнике якоря, имеющего один виток обмотки:

— — изменение тока генератора; --- — изменение тока в проводнике якоря

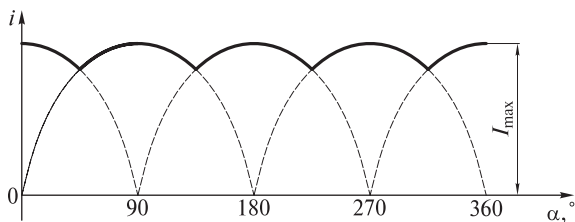


Рис. 1.4. График выпрямленного тока генератора, якорь которого имеет два витка

Пульсации тока во внешней цепи генератора можно уменьшить, если выполнить обмотку якоря из нескольких витков, каждый из которых присоединен к соответствующей паре коллекторных пластин. Так, например, если якорь имеет всего два витка, сдвинутых в пространстве под углом 90° , пульсации тока заметно уменьшаются (рис. 1.4).

При большем числе витков в обмотке якоря пульсации становятся еще меньше. Практически уже при 16 витках в обмотке (и соответственно 16 пластинах в коллекторе) пульсации тока становятся незаметными и ток во внешней цепи (в нагрузке) генератора можно считать постоянным не только по направлению, но и по величине. В связи с этим современные коллекторные машины постоянного тока обычно имеют большое число коллекторных пластин и секций обмотки на якоре.

1.3. Устройство электрической машины постоянного тока

Электрическая машина постоянного тока конструктивно состоит из двух частей: магнитной системы, создающей магнитное поле, и вращающегося в подшипниках якоря с обмоткой \mathcal{G} и коллектором Γ (рис. 1.5). Эти части разделены воздушным зазором.

Магнитное поле в электрических машинах постоянного тока создается обмотками возбуждения \mathcal{B} , расположенными на сердечниках полюсов \mathcal{A} и питаемыми постоянным током. Число полюсов выбирается в зависимости от мощности и назначения электрической машины для подвижного состава и может колебаться от двух до двенадцати. Обычно магнитную систему выполняют в виде сплошной стальной станины \mathcal{B} со съемными шихтованными сердечниками \mathcal{A} . Рассмотрим конструкцию отдельных узлов машины постоянного тока.

Станина. В машинах постоянного тока станина в первую очередь служит магнитопроводом для магнитного потока главных и добавочных полюсов. Кроме того, на ней крепятся полюса и под-

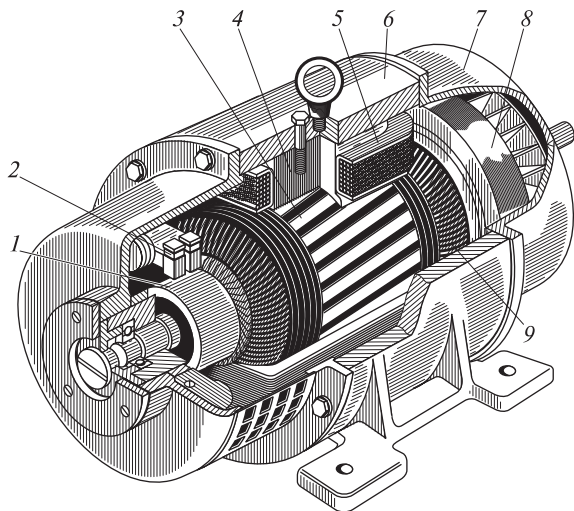


Рис. 1.5. Общий вид машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетка; 3 — сердечник якоря; 4 — сердечник главного полюса; 5 — обмотка возбуждения; 6 — станина; 7 — подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

шипниковые щиты. Поэтому конструкция станины машин постоянного тока может быть литой из стали, сварной из толстолистовой или шихтованной из электротехнической стали. Станина должна обладать достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. Толщина стенки станины выбирается такой, чтобы обеспечить необходимую величину магнитной индукции, и должна составлять не менее половины поперечного сечения главных полюсов. Внутренний диаметр станины определяется с учетом необходимости для размещения якоря, главных и добавочных полюсов и их обмоток. В станинах из стального литья, например, у тяговых электродвигателей локомотивов, для которых важную роль играет уменьшение массы, поперечное сечение может быть уменьшено по осям главных полюсов, так как магнитный поток, переходящий с главного полюса на станину, равномерно распределяется по всей ширине полюса.

Для машин постоянного тока с высокими динамическими нагрузками магнитной цепи, например при питании от статических преобразователей, высоких скоростях нарастания тока якоря, а также при быстром нарастании тока возбуждения, необходимо при изготовлении станины использовать шихтованные листы из электротехнической стали.

Часть станины, образующая коллекторное пространство и не являющаяся магнитопроводом, имеет относительно небольшую толщину стенки, необходимую для обеспечения механической

прочности. Иногда эта часть электрической машины выполняется в виде отдельных ребер, закрытых тонкостенными кожухами.

Главные полюса. Магнитное поле в машине постоянного тока создается магнитодвижущей силой (МДС) обмотки возбуждения, которая выполняется в виде катушек 3, надетых на сердечники 2 главных полюсов (рис. 1.6). Со стороны, обращенной к якору, сердечник заканчивается полюсным наконечником (башмаком) 4, посредством которого обеспечивается равномерное распределение магнитного потока по поверхности якора.

Для снижения потерь башмаки шихтуются из электротехнической стали, а сердечники выполняются монолитными. Однако на практике, как правило, не используют составную конструкцию в виде полюсного сердечника 2 и полюсного башмака 4 и шихтуют главный полюс целиком. Такая конструкция обеспечивает уменьшение вихревых токов в сердечнике полюса, возникающих в результате пульсации магнитной индукции в полюсных наконечниках из-за зубчатой поверхности якора.

Шихтованный из лакированных листов стали полюс прессуется под давлением 200 кПа. Листы стягиваются пропущенными через сердечник болтами или специальными заклепками с нажимными щеками. Болты или заклепки должны распределяться в полюсе как можно более равномерно и выдерживать упругую реакцию сжатого полюса. Нажимные щеки, в которых размещаются головки заклепок или болтов, изготавливаются из отожженных стальных листов толщиной 8...20 мм в зависимости от поперечного сечения и длины полюса.

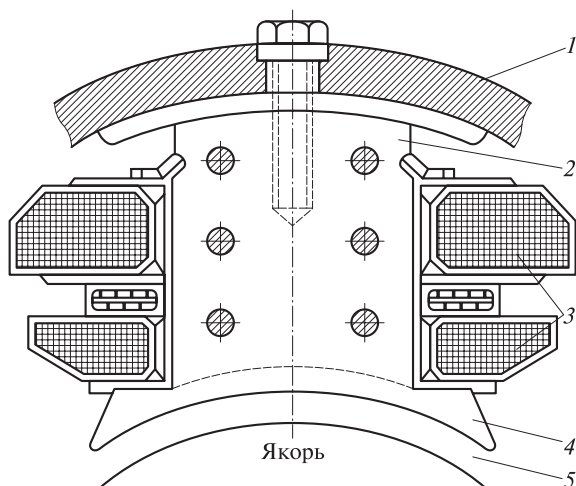


Рис. 1.6. Главный полюс машины постоянного тока:

1 — станина; 2 — сердечник полюса; 3 — катушки обмотки возбуждения; 4 — полюсный башмак; 5 — воздушный зазор

В компенсированных машинах постоянного тока (тепловые генераторы) в полюсных башмаках выштамповываются пазы для размещения компенсационной обмотки, поэтому башмаки в этих машинах имеют большие размеры, чем в компенсированных машинах.

Полюса крепятся к станине болтами или шпильками. Полюсные катушки выполняются из медного провода, намотанного на каркас из изолирующего материала. Иногда катушку делят по высоте на несколько частей, между которыми оставляют вентиляционные каналы. Такая конструкция обеспечивает лучшее охлаждение катушки.

Добавочные полюса. Практически на всех машинах постоянного тока мощностью свыше 1 кВт с целью уменьшения искрения на щетках устанавливаются добавочные полюса.

Добавочный полюс (рис. 1.7) состоит из сердечника 1 и катушки 2, выполненной из медного изолированного провода с сечением, рассчитанным на рабочий ток машины, так как катушка этого полюса включается последовательно с обмоткой якоря. Сердечник добавочного полюса изготавливается из стали и имеет монолитную конструкцию, поскольку из-за малой величины магнитной индукции в сердечнике практически не индуцируются вихревые токи. Добавочные полюса устанавливают посередине между главными полюсами и крепят к станине болтами.

Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Для его регулирования применяются регулировочные пластины из магнитного или немагнитного материала. Окончательная величина воздушного зазора устанавливается при настройке коммутации электрической машины путем построения предельных кривых зоны безыскровой коммутации.

Как правило, в машинах большой мощности воздушный зазор под добавочным полюсом разделяется на две части: сердечник — станина и сердечник — якорь.

Якорь. В машинах постоянного тока якорь состоит из вала, сердечника, обмотки и коллектора. *Сердечник* якоря имеет форму цилиндра. При изготовлении сердечника используют штампованные листы из электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы изолируют при помощи лака или бумаги. Собранный сердечник удерживает-

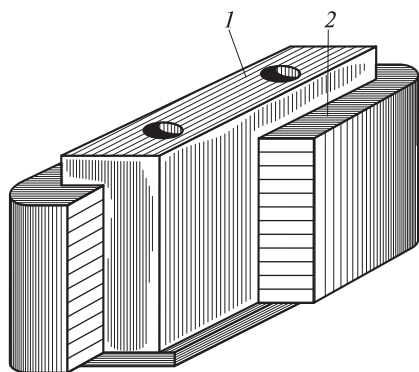


Рис. 1.7. Добавочный полюс машины постоянного тока:

1 — сердечник; 2 — катушка

ся в сжатом состоянии нажимными шайбами. Такая конструкция сердечника якоря дает возможность уменьшить в нем потери энергии от действия вихревых токов, возникающих в результате перемагничивания сердечника при вращении якоря в магнитном поле. Для охлаждения машины в сердечниках якоря выполнены вентиляционные каналы. На поверхности сердечника имеются продольные пазы, в которые укладывается обмотка якоря.

Обмотку якоря выполняют из медного провода круглого или прямоугольного сечения и укладывают в пазах сердечника якоря, тщательно изолируя от сердечника. Обмотка якоря состоит из секций, концы которых припаиваются к пластинам коллектора. Для прочного закрепления проводов обмотки в пазах сердечника якоря применяются деревянные, гетинаксовые или текстолитовые клинья. Однако деревянные клинья не обеспечивают надежного крепления, так как при высыхании они уменьшаются в размерах и могут выпасть из паза. В машинах малой мощности пазы не закрывают, а прикрывают сверху бандажом. Для того чтобы бандаж не выступал за пределы якоря, диаметр углубления под бандаж должен быть меньше диаметра якоря. Бандаж выполняют из стальной проволоки или стеклоткани, наматываемой непосредственно на лобовые части обмотки.

Коллектор состоит из активной части и крепежной конструкции (рис. 1.8). Коллекторные пластины 7 выполняют из холоднокатаной (коллекторной) меди и изолируют друг от друга прокладками из коллекторного миканита — смеси чешуек слюды и шеллака в качестве связующего компонента (около 5 %).

При повышенных механических и термических требованиях коллекторные пластины изготавливают из меди с добавкой серебра (около 0,1 %) или циркония (около 0,06 %). Оба сплава имеют высокую электропроводность и повышенный предел текучести при повышенной температуре при стабильном пределе прочности на растяжение.

К выступающей части коллекторной пластины (петушок 5) припаивают провода обмотки якоря. Нижний край пластины

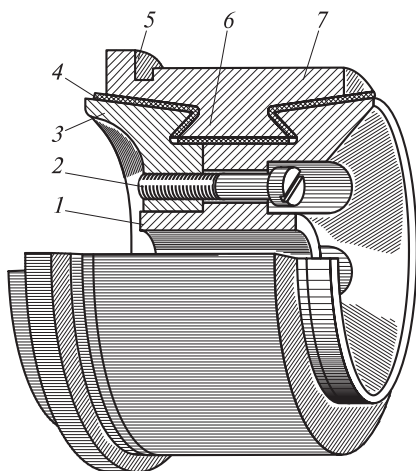


Рис. 1.8. Общий вид коллектора машины постоянного тока:

- 1 — корпус; 2 — стяжной болт; 3 — нажимное кольцо; 4 — изоляция; 5 — петушок; 6 — нижний край пластины; 7 — пластина

стины 7 выполнен в виде «ласточкина хвоста». После сборки коллектора край 6 оказывается зажатым между двумя нажимными кольцами 3, изолированными от коллекторных пластин миканитовыми конусами и цилиндрами. Чтобы миканитовые прокладки при изнашивании пластин коллектора не выступали над пластинами, изоляция должна быть утоплена на глубину до 1,5 мм от поверхности скольжения коллектора в радиальном направлении. Благодаря этому уменьшается опасность возникновения кругового огня при электрическом перекрытии от пластины к пластине и, кроме того, устраняется трение мягких угольных щеток о миканит.

В зависимости от положения поверхности скольжения щеток различают две основные группы коллекторов: дисковые и цилиндрические.

У *дискового* коллектора поверхность скольжения находится в плоскости, перпендикулярной оси. У *цилиндрического* (барabanного) коллектора поверхность скольжения параллельна оси. Чаще всего в настоящее время применяются цилиндрические коллекторы.

В зависимости от способа крепления коллекторных пластин различают две группы цилиндрических коллекторов:

- коллектор, медные пластины которого запрессовываются в пластмассу. Пластмасса в этом случае является скрепляющим и изолирующим материалом. Такая конструкция коллектора проста в изготовлении, но может применяться лишь для машин малой мощности и при частоте вращения до 10 000 об/мин;

- коллектор арочной конструкции. Торцовые поверхности коллектора, имеющие форму «ласточкина хвоста», зажимаются при помощи V-образных нажимных колец так, что на наклонную часть поверхности коллекторных пластин действует нормальное давление. В этом случае между внутренней поверхностью выточки коллекторных пластин и наружным диаметром нажимных колец обязательно должен быть зазор. Пластины коллектора изолируют от нажимных колец специальными прокладками.

Для соединения коллекторных пластин с обмоткой якоря при небольшой разнице диаметров якоря и коллектора коллекторные пластины удлиняют вверх, до достижения диаметра якоря (гребенчатый коллектор).

У малых электрических машин с обмоткой из проводников круглого сечения концы проводников обычно закладываются непосредственно в выфрезерованные в коллекторной пластине пазы. Пайка производится методом погружения, а затем коллектор обрабатывается.

Однако в большинстве случаев, в особенности при существенной разнице диаметров якоря и коллектора, пластины соединяются с обмоткой якоря посредством так называемых петушков.

В пластинах со стороны якоря перед сборкой коллектора выфрезеровывают прорезы (шлицы). Коллекторные петушки впаиваются в эти шлицы с помощью мягкого припоя. Петушки изготавливают из полосовой меди толщиной от 0,5 до 1,5 мм и лудят. Соединение с концами обмоток производится с помощью стяжных скоб.

Щеточное устройство. Электрический контакт с поверхностью коллектора в машине постоянного тока осуществляется с помощью щеток. Они устанавливаются в щеточном устройстве, которое состоит из щеточной траверсы, пальцев и щеткодержателей.

Щеткодержатели крепятся непосредственно или через зажимные элементы на щеточных болтах изолированно, или же монтируются без изоляции непосредственно на щеточных bracketах (кронштейнах) или щеточных траверсах, которые изолированы относительно корпуса.

Щеткодержатели вместе с траверсами выполняют следующие функции:

- удерживают щетки в установленном радиальном или наклонном, а также аксиальном и окружном направлениях, обеспечивая свободное перемещение щеток без перекоса при работе и по мере их износа;

- обеспечивают требуемое давление на щетки, которое должно быть по возможности постоянным во всем диапазоне допустимого износа щеток. Это осуществляется благодаря применению специальной кинематической схемы щеткодержателя или регулированием давления вручную. Чрезмерное давление может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточное — искрение на коллекторе;

- передают ток щеток (раздельно для положительных и отрицательных щеток) в якорную цепь или из нее.

Во избежание замыкания щеткодержатели должны быть изолированы от корпуса электрической машины. Для уменьшения вибрации щеткодержатель должен иметь достаточную жесткость.

Щетки каждой полярности должны иметь поперечное сечение не более 1000 мм². Это означает, что при допустимой плотности тока 0,1 А/мм² одна щетка может выдерживать максимальный ток 100 А. При необходимости увеличения общего тока устанавливают несколько щеток. Причем действует правило, что на один щеточный bracket допускается максимальный ток 1000 А.

В машинах постоянного тока размеры и положение щеткодержателей по окружности коллектора определяют допустимым щеточным перекрытием (отношением длины дуги одновременно перекрываемых щеткой коллекторных пластин к длине коллекторного деления).

Название «щетка» возникло в начальный период практической электротехники, когда первые устройства этого рода действительно были щетками или кисточками. Они состояли из собранных в пу-

чок медных проволок, которые свободным концом скользили по коллектору или контактными кольцам. В настоящее время такое наименование уже не соответствует действительности, но оно прочно вошло в международную техническую терминологию.

Термин «угольные щетки» применяют не только к щеткам, состоящим исключительно из угля, но и к щеткам, содержащим большее или меньшее количество медного порошка (см. Приложение).

Следует учитывать, что угольные щетки имеют отрицательный температурный коэффициент, т. е. их электропроводность увеличивается с повышением температуры. Поэтому необходимо, чтобы на одной машине применялись только щетки с одинаковой электропроводностью. В противном случае возможно, что одна из более горячих щеток будет проводить больше тока, чем другие, и нагреется вследствие этого еще больше. В результате произойдет дальнейшее нарушение распределения тока между параллельно включенными щетками.

Помимо рассмотренных узлов в конструкцию машины входят два подшипниковых щита: передний (со стороны коллектора) и задний. Щит с помощью болтов крепится к станине. В центральной части щита имеется расточка под подшипник. Обычно в машинах применяются шариковые или роликовые подшипники качения; лишь в некоторых машинах с целью обеспечения бесшумности применяют подшипники скольжения.

Подвод и снятие напряжения с электрических машин, а также подвод тока к обмоткам возбуждения осуществляется через специальные зажимы. Эти зажимы закреплены на планках или клеммных коробках, расположенных на станине, а в некоторых машинах на переднем подшипниковом щите.

Выводы обмоток машин постоянного тока обозначаются по ГОСТ 26772—85 следующим образом:

Обмотка якоря	Я1 и Я2
Обмотка добавочных полюсов	Д1 и Д2
Обмотка компенсационная	К1 и К2
Обмотка возбуждения параллельная (шунтовая)	Ш1 и Ш2
Обмотка возбуждения последовательная (серийная)	С1 и С2

Цифрой 1 обозначаются начала обмоток, а цифрой 2 — концы.

1.4. Обмотки машины постоянного тока

Итак, для работы коллекторной машины постоянного тока необходимо наличие в ней двух обмоток: обмотки возбуждения и обмотки якоря. Первая служит для создания в машине магнитного поля, т. е. для возбуждения. В якорной обмотке индуцируется ЭДС,

под действием которой возникает электрический ток и, как следствие, электромагнитный момент. Обмотка состоит из соединенных между собой витков. Каждый виток имеет две активные стороны 1 и 3 и лобовую часть 2 (рис. 1.9). Исключение составляют магнитоэлектрические машины постоянного тока, в которых имеется лишь одна (якорная) обмотка, так как магнитное поле (возбуждение) в этих машинах создается постоянными магнитами.

Таким образом, *обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.*

Простейшей частью обмотки является *секция* — два проводника, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном полюсному шагу или незначительно отличающемся от него, и присоединяемых к двум коллекторным пластинам. Суммарная ЭДС секции будет наибольшей, если ЭДС активных сторон равны по величине и сдвинуты по фазе на 180 эл. град. В этом случае при обходе секции ЭДС складываются арифметически. В лобовых частях секции ЭДС не индуцируется. Это происходит, когда ширина (шаг) секции по пазам якоря равна полюсному делению τ . Такую обмотку называют *диаметральной*.

Часть поверхности якоря, приходящуюся на один полюс, называют *полюсным делением* и определяют по формуле

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (1.10)$$

где τ — полюсное деление, м; D — диаметр якоря, м; $2p$ — число главных полюсов в машине.

Секции укладываются в пазах сердечника якоря в два слоя, при этом если одна из активных сторон секции находится в нижней части одного паза, то ее другая сторона находится в верхней части другого паза. Верхняя активная сторона одной секции и нижняя активная сторона другой, уложенные в одном пазу, образуют *элементарный паз* (Z_3). В реальном пазу может быть и более двух активных сторон, например четыре, шесть, восемь и т. д. В этом случае считается, что реальный паз состоит из нескольких элементарных пазов.

Так как секция имеет две активные стороны, то каждой

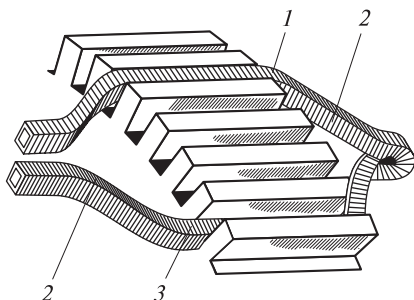


Рис. 1.9. Виток якорной обмотки:
1, 3 — активные стороны обмотки;
2 — лобовая часть

секции соответствует один элементарный паз. Концы секции присоединяются к коллекторным пластинам, при этом к каждой пластине присоединяются конец одной секции и начало следующей, т. е. на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина. Таким образом, для якорной обмотки можно записать следующее равенство:

$$S = Z_3 = K, \quad (1.11)$$

где S — число секций в обмотке якоря; Z_3 — число элементарных пазов; K — число коллекторных пластин.

В зависимости от формы секций и способа присоединения их к коллектору различают следующие типы якорных обмоток:

- простая петлевая;
- сложная петлевая;
- простая волновая;
- сложная волновая;
- комбинированная (лягушечья).

1.4.1. Простая петлевая обмотка

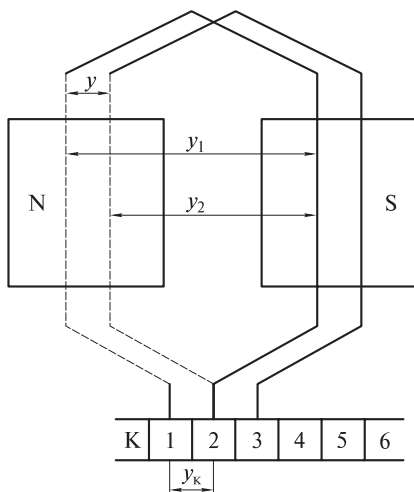
При изготовлении петлевой обмотки сначала последовательно соединяют секции, расположенные под одним полюсом, а затем соединяют секции, расположенные под следующим полюсом, и т. д. В простой петлевой обмотке якоря каждая секция присоединяется к двум рядом лежащим коллекторным пластинам. При укладке секций на сердечник якоря начало каждой последующей секции соединяют с концом предыдущей, постепенно перемещаясь при этом по поверхности якоря (и коллектора) так, что за один обход укладывают все секции обмотки. В результате конец последней секции оказывается соединенным с началом первой, т. е. обмотка замыкается.

На рис. 1.10 изображены две секции простой петлевой обмотки и обозначены шаги обмотки. Шаг обмотки — это расстояние между двумя активными сторонами секций, выражаемое числом находящихся между ними элементарных пазов. Реальный паз может состоять из одного или нескольких элементарных пазов, т. е. по ширине паза может располагаться одна или несколько сторон секций. Кратчайшее расстояние между активными сторонами первой секции на поверхности якоря называют *первым частичным шагом обмотки по якорю* u_1 . Это расстояние измеряется в элементарных пазах и, как было указано ранее, должно быть равно или незначительно отличаться от полюсного деления.

Расстояние между активной стороной нижнего слоя второй секции и активной стороной верхнего слоя первой секции называют *вторым частичным шагом обмотки по якорю* u_2 и измеряют в

Рис. 1.10. Секции простой петлевой обмотки:

y_1 и y_2 — первый и второй частичные шаги обмотки по якорю; y_k — шаг обмотки по коллектору; y — результирующий шаг обмотки по якорю; К — коллектор



элементарных пазах. Знание шагов обмотки y_1 и y_2 дает возможность определить *результрующий шаг обмотки по якорю* y , который представляет собой расстояние между расположенными в одном слое активными сторонами двух следующих друг за другом секций, т. е. $y = y_1 - y_2$.

Укладывая секции обмотки, мы перемещаемся не только по сердечнику якоря, но и по коллектору. Расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец одной секции, называют *шагом обмотки по коллектору* y_k .

Как следует из определения, начало и конец каждой секции простой петлевой обмотки присоединяются к рядом лежащим коллекторным пластинам, следовательно,

$$y = y_k = \pm 1. \quad (1.12)$$

В выражении (1.12) знак «+» соответствует *правоходовой* обмотке, а знак «-» — *левоходовой*.

Для определения всех шагов простой петлевой обмотки достаточно рассчитать первый частичный шаг по якорю

$$y_1 = \frac{Z_{\text{я}}}{2p} \pm \epsilon, \quad (1.13)$$

где ϵ — величина, меньшая единицы, используемая для получения шага y_1 , выраженного целым числом.

На основании формулы (1.12) определяем второй частичный шаг обмотки

$$y_2 = y_1 \pm y = y_1 \pm 1. \quad (1.14)$$

Прежде чем приступить к построению развернутой схемы обмотки (рис. 1.11), необходимо отметить следующее:

- все пазы сердечника якоря и секции обмотки нумеруются. При этом номер секции определяется номером паза, в верхней части которого находится одна из ее активных сторон;

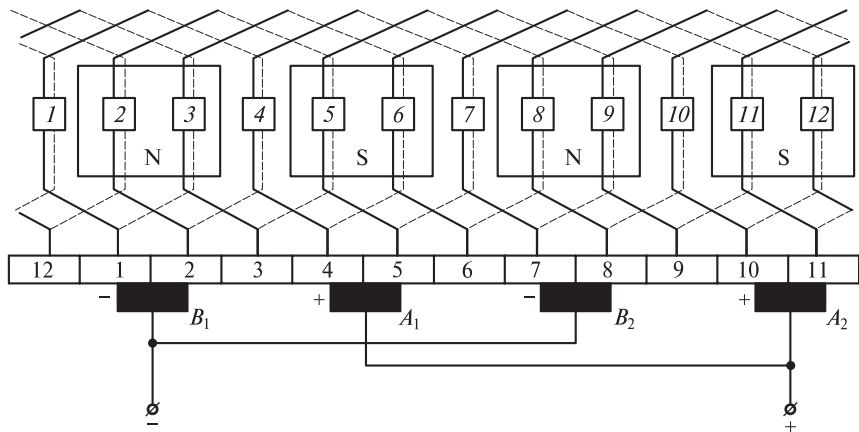


Рис. 1.11. Развернутая схема простой петлевой обмотки

- активные стороны верхнего слоя изображают на схеме сплошными линиями, а стороны нижнего слоя — пунктирными так, что одна половина секции, относящаяся к верхнему слою, показывается на схеме сплошной линией, а другая, относящаяся к нижнему слою, — пунктирной.

На листе бумаги размечают пазы и наносят контуры полюсов. При этом следует учесть, что изображенный на схеме полюс представляет собой зеркальное отражение полюса, находящегося над якорем. При выполнении схемы обмотки ширину полюса следует принять приблизительно равной $0,8\tau$. Полярность полюсов чередуется: N—S—N—S. Затем изображают коллекторные пластины и наносят на схему первую секцию, активные стороны которой расположены в пазах 1 и 4. Значение шага y_1 рассчитывают по формуле (1.13). Коллекторные пластины, к которым присоединены концы первой секции, обозначают цифрами 1 и 2. Затем нумеруют остальные коллекторные пластины и последовательно наносят на схему другие секции (вторую, третью и т.д.). Последняя секция (двенадцатая) должна замкнуть обмотку, что будет свидетельствовать о правильно выполненной схеме.

Далее на схеме изображают щетки. Расстояние между щетками, например A_1 и B_1 должно соответствовать полюсному делению, т.е. должно составлять $K/2p$ коллекторных делений. Электрический контакт якорной обмотки с внешней цепью осуществляется через коллектор и щетки. Наибольшее значение ЭДС машины соответствует положению щеток на геометрической нейтральной. Но так как коллекторные пластины, к которым присоединены секции, смещены относительно активных сторон этих секций приблизительно на $1/2\tau$, то щетки следует располагать на коллекторе по оси главных полюсов машины.

Предположим, что машина работает в режиме генератора и ее якорь вращается в направлении слева направо. Воспользовавшись правилом правой руки, определяем направление ЭДС (тока), индуцируемой в активных сторонах секций. Это дает нам возможность установить полярность щеток: щетки A_1 и A_2 , от которых ток отводится во внешнюю цепь, являются положительными, а щетки B_1 и B_2 — отрицательными. Щетки одинаковой полярности соединяют параллельно и подключают к соответствующим выводам машины. При этом щетки положительной полярности чередуются с щетками отрицательной полярности.

Схема простой петлевой обмотки состоит из четырех участков, каждый из которых образует параллельную ветвь обмотки и представляет собой несколько последовательно соединенных секций с одинаковым направлением тока.

Затем приступают к обходу секций обмотки, начиная с первой секции. Далее идут вторая и третья секции, которые образуют одну параллельную ветвь, в то время как первая секция оказывается замкнутой накоротко щеткой B_1 . Подобным образом обходят всю обмотку. В результате получается электрическая схема обмотки с четырьмя параллельными ветвями, где каждая параллельная ветвь содержит две последовательно включенные секции.

Электродвижущие силы секций в пределах каждой параллельной ветви складываются. Так как все ветви соединены параллельно, то ЭДС всей обмотки якоря определяется величиной ЭДС одной параллельной ветви, тогда как величина тока якорной обмотки равна сумме токов всех ветвей обмотки:

$$I_{я} = 2ai_a, \quad (1.15)$$

где $I_{я}$ — величина тока якорной обмотки, А; $2a$ — число параллельных ветвей обмотки; i_a — величина тока одной параллельной ветви, А.

Рассматриваемая обмотка якоря содержит четыре параллельные ветви, т.е. столько же, сколько главных полюсов в машине. Это совпадение не случайно, так как в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей всегда равно числу главных полюсов машины:

$$2a = 2p. \quad (1.16)$$

Число параллельных ветвей в обмотке якоря влияет на основные рабочие параметры машины — напряжение и величину тока.

1.4.2. Сложная петлевая обмотка

Итак, в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей равно числу главных полюсов машины. При необходимости получить обмотку с большим числом параллельных ветвей, например,

как это требуется в низковольтных машинах с большими токовыми нагрузками, пришлось бы делать машину многополюсной, что обусловило бы увеличение ее размеров и стоимости. Хорошим решением в такой ситуации является применение сложной петлевой обмотки, которая сочетает в себе несколько простых обмоток (ходов), уложенных на один якорь. Число параллельных ветвей в сложной петлевой обмотке составляет

$$2a = 2pt, \quad (1.17)$$

где t — коэффициент кратности, определяющий число простых петлевых обмоток, из которых составлена сложная обмотка.

Ширина щеток в машине со сложной петлевой обмоткой принимается такой, чтобы каждая щетка одновременно перекрывала не менее m коллекторных пластин, т. е. столько пластин, сколько простых обмоток содержится в сложной. В этом случае простые обмотки оказываются соединенными параллельно друг с другом. Для того чтобы щетка могла соединять эти обмотки параллельно, пришлось раздвинуть стороны секции и коллекторные пластины одной обмотки и разместить между ними стороны секции и коллекторные пластины другой обмотки. Поэтому шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг по якорю сложной обмотки по сравнению с этими же параметрами простой петлевой обмотки увеличился в m раз:

$$y_k = y = m. \quad (1.18)$$

Первый частичный шаг обмотки по якорю подсчитывается по формуле (1.13).

1.4.3. Простая волновая обмотка

В волновых обмотках последовательно соединяются секции, начала которых расположены под соседними парами полюсов (рис. 1.12). Таким образом, в четырехполюсной машине при одном обходе вокруг якоря последовательно соединяются две секции, в шести- и восьмиполюсных машинах соответственно три и четыре секции и т. д. Концы секций волновой обмотки присоединяются к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстояние шага обмотки по коллектору $y_k = y$. За один обход по якорю укладывается столько секций, сколько пар полюсов имеет машина, при этом конец последней по обходу секции присоединяют к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной.

Простая волновая обмотка называется *левоходовой*, если конец последней по обходу секции присоединяется к коллекторной пластине, расположенной слева от исходной. Если же эта пластина

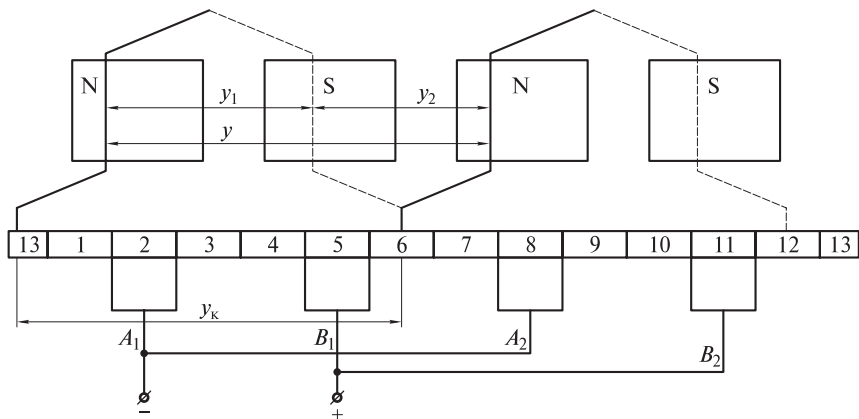


Рис. 1.12. Шаги простой волновой обмотки

расположена справа от исходной, то обмотка называется *правоходовой*. Секции волновой обмотки могут быть одновитковыми и многовитковыми.

Так как шаг обмотки по коллектору y_k охватывает пространство по длине окружности коллектора, соответствующее одной паре полюсов, то, сделав один обход по коллектору, мы как бы перемещаемся на число коллекторных делений, равное $y_k p$ (p — число пар полюсов), и переходим к пластине, расположенной рядом с исходной. На основании сказанного можно записать

$$y_k p = K \pm 1. \quad (1.19)$$

Следовательно, шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг по якорю равны, т. е.

$$y_k = y = \frac{K \pm 1}{p}. \quad (1.20)$$

Знак « \rightarrow » соответствует левоходовой обмотке, а « \leftarrow » — правоходовой. Выполнение правоходовой обмотки связано с дополнительным расходом меди из-за скрещивания лобовых частей секций, поэтому она почти не имеет практического применения.

Первый частичный шаг обмотки по якорю определяется по формуле (1.13), а второй шаг

$$y_2 = y - y_1. \quad (1.21)$$

Из приведенной схемы простой волновой обмотки видно, что секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины. Следует также отметить, что в такой обмотке можно было бы ограничиться применением только двух щеток, например B_2 и A_2 . Однако в этом случае нарушилась бы симметрия обмотки, так как число секций в параллельных ветвях

становится неодинаковым: в одной ветви семь секций, а в другой шесть. Поэтому в машине обычно устанавливают столько щеток, сколько имеется главных полюсов, тем более что это позволяет уменьшить величину тока, приходящегося на каждую щетку, и уменьшить размеры коллектора.

1.4.4. Сложная волновая обмотка

Несколько простых волновых обмоток, уложенных на одном якоре, образуют сложную волновую обмотку. Так как простая волновая обмотка состоит из двух параллельных ветвей, то число параллельных ветвей в сложной волновой обмотке составляет

$$2a = 2m, \quad (1.22)$$

где m — коэффициент кратности, определяющий число простых волновых обмоток, из которых составлена сложная обмотка.

Сложная волновая обмотка рассчитывается так же, как и простая. Но для определения шага обмотки по коллектору следует использовать формулу

$$y_k = \frac{K \pm m}{p}. \quad (1.23)$$

Простые волновые обмотки, образующие сложную, соединяются параллельно друг с другом посредством щеток, ширина которых, как и в случае сложной петлевой обмотки, должна обеспечивать одновременное перекрытие не менее m коллекторных пластин.

1.4.5. Условия симметрии обмотки

Обмотка якоря называется *симметричной*, если ее параллельные ветви обладают одинаковыми электрическими свойствами, т. е. имеют одинаковые электрические сопротивления и в них индукцируются одинаковые по величине ЭДС.

В несимметричной обмотке ток якоря в параллельных ветвях распределяется неравномерно, что влечет за собой перегрузку одних ветвей и недогрузку других. В результате возрастают электрические потери в обмотке якоря, полезная мощность машины уменьшается, возникает искрение на коллекторе.

Обмотка якоря становится симметричной лишь при соблюдении следующих *условий симметрии*:

1) каждая пара параллельных ветвей обмотки должна состоять из одинакового числа секций. Это условие может быть выполнено лишь в том случае, если на каждую пару параллельных ветвей

обмотки приходится целое число секций, т. е. отношение S/a равно целому числу. Нетрудно убедиться, что при несоблюдении этого условия электрическое сопротивление параллельных ветвей, а также их ЭДС будут неодинаковыми. Это приведет к неравномерному распределению тока в параллельных ветвях со всеми нежелательными последствиями;

2) секции каждой пары параллельных ветвей должны занимать на якоре одинаковое число пазов, т. е. Z/a равно целому числу, где Z — число реальных пазов на якоре;

3) каждая пара параллельных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение относительно системы полюсов, что может быть соблюдено при условии $2p/a$ равно целому числу.

Определим, при каких параметрах выполняется третье условие симметрии для сложной петлевой обмотки. На основании выражения (1.17) получаем

$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{pt} = \frac{2}{t}. \quad (1.24)$$

Все отношения, входящие в выражение (1.24), равны целому числу, т. е. сложная петлевая обмотка может быть симметричной только при $t = 2$.

Для устранения уравнивающих токов в обмотке якоря недостаточно выполнения условий симметрии обмотки. Для этого необходимо еще, чтобы магнитные потоки полюсов были равны. Кроме того, сопротивления контактов между щетками и коллекторными пластинами каждого из ходов обмотки, составляющих обмотку, также должны быть равны.

Неравенство магнитных потоков полюсов вызывает в петлевых обмотках неравенство ЭДС параллельных ветвей и появление уравнивающего тока, замыкающегося через щетки.

Вследствие неравенства сопротивлений переходного контакта между щеткой и отдельными коллекторными пластинами в параллельных ветвях обмоток, составляющих сложную обмотку, токи будут разные. Это приводит к случайному распределению напряжения между соседними коллекторными пластинами, в результате чего напряжение может превысить допустимые значения.

1.4.6. Уравнивательные соединения

Однако даже при соблюдении всех условий симметрии ЭДС параллельных ветвей обмотки якоря в многополюсных машинах могут оказаться неодинаковыми. Причиной этого является *магнитная асимметрия*, в результате которой магнитные потоки одноименных полюсов становятся неодинаковыми. Происходит это из-за дефектов, возникающих при изготовлении электрической

машины (наличие раковин в отливке станины, некачественная сборка полюсов, неправильная центровка якоря, т.е. его перекося) и обуславливающих появление неравномерного воздушного зазора под полюсами.

Влияние магнитной асимметрии на работу машины зависит от типа обмотки якоря.

В волновых обмотках секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины, поэтому магнитная асимметрия не вызывает неравенства ЭДС в параллельных ветвях, так как она одинаково влияет на все параллельные ветви обмотки.

В петлевых обмотках секции каждой параллельной ветви располагаются под одной парой полюсов, поэтому в результате магнитной асимметрии ЭДС параллельных ветвей становятся неодинаковыми, что приводит к появлению уравнивающих токов. Например, при неравенстве ЭДС e_1 и e_2 потенциалы щеток A_1 и A_2 неодинаковы, а так как указанные щетки соединены проводом, то в обмотке появится уравнивающий ток $I_{ур}$. Если $e_1 > e_2$, то ток $I_{ур}$ во внешней части цепи направлен от щетки A_1 к щетке A_2 .

При неравенстве ЭДС во всех четырех ветвях обмотки якоря уравнивающие токи появятся также и в цепи щеток B_1 и B_2 . Уравнивательные токи, складываясь с током нагрузки, вызывают неравномерную нагрузку параллельных ветвей, что ведет к перегреву обмотки и увеличению электрических потерь. Кроме того, плотность тока под некоторыми щетками увеличивается и может превысить допустимые пределы, что вызовет искрение на коллекторе.

Уравнивательные соединения первого рода. Перечисленные явления нарушают нормальную работу машины. Для уменьшения неравномерной нагрузки щеток в простых петлевых обмотках поступают следующим образом: точки обмотки якоря, потенциалы которых теоретически должны быть одинаковыми, соединяют между собой медными проводами. В этом случае возникающие в обмотке уравнивательные токи циркулируют внутри обмотки и не протекают по щеткам и соединяющим их шинам.

Указанные соединения называются *уравнивательными соединениями первого рода*, или уравнивателями (рис. 1.13). Практически доступными для соединения точками равного потенциала являются концы секций, присоединяемые к коллекторным пластинам, и лобовые части обмотки со стороны, обратной коллектору.

Количество точек в обмотке, имеющих одинаковый потенциал, равно числу полюсов в машине ($p = a$). Расстояние между двумя соседними равнопотенциальными точками называется *потенциальным шагом* и обозначается $y_{ур}$. При расположении уравнивательных соединений со стороны коллектора потенциальный шаг измеряется числом коллекторных делений:

простые обмотки соединяются между собой в точках равного потенциала.

Таким образом, если уравниватели первого рода выравнивают асимметрию магнитной системы машины, то уравниватели второго рода устраняют неравномерность в распределении потенциала по коллектору. В схеме сложной волновой обмотки уравниватели второго рода соединяют коллекторные пластины одинакового потенциала и отстоят друг от друга на расстоянии, равном потенциальному шагу $y_{ур}$.

Полное число уравнивателей второго рода определяется по выражению (1.26), однако из соображений экономии меди их число обычно меньше расчетного.

1.4.7. Комбинированная обмотка

Комбинированная (лягушечья) обмотка представляет собой сочетание петлевой ($y_{петл}$) и волновой ($y_{волн}$) обмоток, расположенных в одних пазах и присоединенных к общему коллектору. Секция этой обмотки показана на рис. 1.14. Комбинированную обмотку можно рассматривать как две параллельно соединенных обмотки: петлевую и волновую.

Каждая простая обмотка выполняется двухслойной, поэтому комбинированная обмотка укладывается на якоре в четыре слоя, а к каждой пластине коллектора припаивается по четыре проводника.

Комбинированная обмотка применяется в мощных электрических машинах. Ее основное преимущество состоит в том, что она не требует уравнивательных соединений.

Обмотки, составляющие комбинированную, имеют одинаковые шаги по якору:

$$y_{1петл} = y_{1волн}. \quad (1.27)$$

Шаг комбинированной обмотки равен сумме шагов простых обмоток:

$$y_{1петл} + y_{1волн} = \frac{Z_э}{2p} + \frac{Z_э}{2p} = \frac{Z_э}{p}. \quad (1.28)$$

Поскольку число элементарных пазов $Z_э = K$, то $y_{1петл} + y_{1волн} = \frac{K}{p} = y_{ур}$, т. е. шаг обмотки по якору равен потенциальному шагу.

Следовательно, те коллекторные пластины, которые должны быть соединены уравнивателями, в комбинированной обмотке соединяются секциями, поэтому уравнивательные соединения в данной обмотке не применяются.