

С. А. ЛОБЗИН

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебник

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)  
в качестве учебника для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих программу СПО  
по специальности 140448 «Техническая эксплуатация  
и обслуживание электрического и электромеханического  
оборудования», ПМ.01 «Организация технического обслуживания  
и ремонта электрического и электромеханического оборудования»,  
МДК.01.01 «Электрические машины и аппараты»*

*Регистрационный номер рецензии 191  
от 10 мая 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2012

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я723  
Л681

Рецензенты:

зав. сектором Центра компьютерного обучения Колледжа  
многоуровнего профессионального образования Академии народного хозяйства  
при Правительстве Российской Федерации *А. А. Соломашкин*

**Лобзин С.А.**

Л681 Электрические машины : учебник для студ. учреждений  
сред. проф. образования / С.А.Лобзин. — М. : Издательский  
центр «Академия», 2012. — 336 с.  
ISBN 978-5-7695-4323-4

Излагаются основы теории генераторов и двигателей постоянного тока, трансформаторов, асинхронных двигателей и синхронных машин. Уделяется значительное внимание физическим явлениям, на которых основаны принципы работы электрических машин и трансформаторов. Отмечаются общие свойства различных электрических машин.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины ОП.10. «Электрические машины» по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств», а также 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.

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я723

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

© Лобзин С.А., 2012  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012  
ISBN 978-5-7695-4323-4

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебнике принята следующая последовательность изучения материала: машины постоянного тока (общие вопросы, генераторы, двигатели); трансформаторы; машины переменного тока (общие вопросы, асинхронные двигатели, синхронные генераторы, синхронные двигатели). Рассматриваются также некоторые специальные типы машин. Затрагиваются вопросы, касающиеся перспектив развития электромашиностроения.

Уделяется значительное внимание физическим явлениям, понимание которых необходимо для уяснения принципов работы электрических машин и трансформаторов. В тексте имеются напоминания из курсов физики, математики, электротехники и технической механики, связанные с рассматриваемыми вопросами. Таким образом, в большинстве случаев отпадает потребность поиска сведений, необходимых для понимания изучаемого материала, в других учебных и справочных изданиях.

Автор стремился изложить материал таким образом, чтобы он был вполне доступен для самостоятельного изучения предмета.

В учебнике имеются указания на общие свойства различных электрических машин, а также на аналогии между различными явлениями. Дается много ссылок на предыдущие подразделы, рисунки и формулы. Для надлежащего усвоения курса студентам рекомендуется не пренебрегать этими ссылками, а также примечаниями и справками, приводимыми по ходу основного текста.

После каждой главы помещены вопросы, облегчающие усвоение дисциплины.

### **Общие сведения об электрических машинах и трансформаторах.**

Электрические машины используются для преобразования механической энергии в электрическую и электрической в механическую, для преобразования напряжения и его частоты и др. Работа электрических машин и трансформаторов основана на явлении электромагнитной индукции.

Машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, называются *электрическими (электромашиными) генераторами*; электрические машины, предназначенные для обратного преобразования, называются *электродвигателями*. Машины, применяемые для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный), преобразования частоты и числа фаз переменного тока, преобразования постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения, называются *электромашинными преобразователями*.

Электрическая машина имеет вращающуюся часть (ротор) и неподвижную часть (статор). Для электрических машин характерно свойство обратимости, заключающееся в том, что одна и та же машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

В зависимости от того, какого рода ток электрические машины генерируют или потребляют, различают машины переменного и постоянного токов.

*Машины переменного тока* подразделяются на синхронные и асинхронные. В тех и других машинах при их работе возникает вращающееся магнитное поле. Ротор синхронной машины вращается со скоростью, равной скорости вращения магнитного поля статора. Скорость вращения ротора асинхронной машины отличается от скорости вращения поля статора.

Машины переменного тока бывают однофазные и многофазные (чаще всего трехфазные); первые генерируют или потребляют однофазный ток, вторые — многофазный ток.

*Машины постоянного тока* снабжаются коллектором. В генераторе коллектор служит для получения ЭДС постоянного направления,

а в двигателе — для переключения токов в секциях обмотки ротора (якоря) таким образом, чтобы обеспечить вращающий момент неизменного направления.

Имеются машины, объединяющие в своей конструкции и принципах работы особенности машин различных типов. Так, например, замечательными свойствами обладают *асинхронизированные синхронные машины*, которые используются на практике (пока еще не очень широко) и в качестве генераторов, и в качестве двигателей, а также для преобразования частоты.

Другой пример машин расширенной области использования — *универсальные коллекторные двигатели*, работающие от сети переменного или постоянного токов. Коллекторные двигатели дают возможность получать значительно более высокую скорость вращения, чем синхронные и асинхронные машины, и выполнять регулировку скорости в широких пределах. Область применения их, однако, ограничена высокой стоимостью, сложностью обслуживания и относительно низкой надежностью в работе.

Отметим, что приведенная здесь краткая классификация электрических машин не исчерпывает всего их многообразия.

В одном курсе с электрическими машинами принято изучать *трансформаторы*, не являющиеся машинами по смыслу термина. Трансформатор представляет собой статический аппарат, не имеющий вращающейся части и предназначенный, прежде всего, для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Принцип работы трансформатора, как и электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции, а уравнения, описывающие его свойства, аналогичны уравнениям электрических машин, в частности, асинхронных двигателей. Схемы замещения и векторные диаграммы трансформаторов и асинхронных двигателей вполне аналогичны.

Аналогия между электрическими машинами и трансформаторами особенно ярко выражена в конструкции и принципе работы индукционного регулятора и фазорегулятора. Эти аппараты представляют собой специально выполненные асинхронные двигатели, используемые при заторможенном роторе, который способен, однако, поворачиваться на произвольные углы в пределах  $360^\circ$ .

Существует большое число типов трансформаторов, имеющих различное назначение. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Электроэнергия генерируется на электростанциях при напряжениях в десятки киловольт, но для экономичной передачи энергии на большие расстояния применяется значительно более высокое

напряжение. Для повышения напряжения применяются силовые повышающие трансформаторы. Вблизи потребителей, для питания которых обычно требуется напряжение в сотни вольт, устанавливаются силовые понижающие трансформаторы.

К трансформаторам специального назначения относятся силовые специальные (выпрямительные, сварочные, печные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т. д.

### **Сведения из истории вращающихся электрических машин.**

В 1821 г. английский физик и химик Майкл Фарадей установил, что электрический ток, проходящий по проводнику, может заставить этот проводник совершать вращение вокруг магнита или вызывать вращение магнита вокруг проводника. Таким образом, опыт М. Фарадея являлся наглядной иллюстрацией принципиальной возможности построения электродвигателя. В 1831 г. М. Фарадей показал возможность «превращения магнетизма в электричество», открыв тем самым явление электромагнитной индукции, на котором основаны принципы действия электрических машин и трансформаторов.

В следующем году, 1832 г., российский физик Эмилий Христианович Ленц установил правило определения направления ЭДС индукции и индукционного тока, что позволило ему сформулировать принцип обратимости генераторного и двигательного режимов электрической машины.

В том же году анонимным изобретателем был создан первый однофазный синхронный многополюсный генератор.

В 1834 г. американский физик Джозеф Генри опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием», в которой он описал построенный им электродвигатель. В этом устройстве впервые была сделана попытка использовать притяжение разноименных и отталкивание одноименных магнитных полюсов для получения непрерывного движения (в данном случае, колебательного).

В том же году российский физик Борис Семенович Якоби построил и описал первый двигатель постоянного тока с вращательным движением якоря. Двигатель питался от батареи гальванических элементов. Возбуждение машины осуществлялось от постоянных магнитов.

В 1838 г. Э. Х. Ленц осуществил на практике обратимость электрической машины постоянного тока, заставив ее работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Однако использование

принципа обратимости в широких масштабах началось лишь с 70-х гг. XIX века.

В 40-х гг. XIX в. Б. С. Якоби создал множество конструкций двигателей. Однако выполненные им испытания обнаружили, что при питании электродвигателей током от гальванических батарей механическая энергия получается чрезмерно дорогой; вследствие этого была признана крайняя неэкономичность электродвигателей. Необходимо отметить, что большим недостатком гальванических батарей является их малая энергоемкость (т. е. малая мощность, приходящаяся на единицу массы), вынуждавшая использовать очень большое число батарей, что для многих транспортных установок является неприемлемым. Произведенные опыты, а также теоретическое исследование электрической машины привели Б. С. Якоби к очень важному для практики выводу: разрешение вопроса о более или менее широком применении электродвигателей находится в прямой зависимости от удешевления электроэнергии, т. е. от создания генератора более экономичного, чем гальванические батареи. Первый генератор постоянного тока был построен Б. С. Якоби в 1842 г.

Некоторые из электродвигателей, построенных в 40—60-х гг. XIX в., действовали на принципе втягивания стального сердечника в соленоид; получавшееся при этом возвратно-поступательное движение преобразовывалось посредством балансира или кривошипно-шатунного механизма во вращательное движение вала, снабженного для равномерности хода маховыми колесами. Таковы, например, электродвигателя Пейджа и Бурбуза.

Итальянским ученым Антонио Пачинотти в 1860 г. был создан электродвигатель с кольцевым неявнополюсным якорем, вращающимся в магнитном поле электромагнитов. Главное значение работы Пачинотти состоит в том, что им был сделан важный шаг на пути построения современной машины постоянного тока: явнополюсный якорь был заменен неявнополюсным. К этому следует добавить удобную схему возбуждения и коллектор современного типа. Двигатель А. Пачинотти обладал практически постоянным вращающим моментом. А. Пачинотти указал на возможность обращения своего двигателя в генератор. Однако, не зная о возможности применения самовозбуждения машины, он рекомендовал для использования машины в режиме генератора заменить электромагниты постоянными магнитами. В 1863 г. А. Пачинотти продемонстрировал принцип обратимости электрических машин и выдвинул идею о возможности использования электрических генераторов постоянного тока для электролитического получения металлов (электролиза) и передачи электрической энергии на большие расстояния.

В 1867 г. Зеноб Теофиль Грамм, родившийся в Бельгии и работавший во Франции, построил первый надежный и удобный в эксплуатации электромашинный генератор, позволяющий получать относительно дешевую электроэнергию. С этого времени химические источники тока, обеспечивающие функционирование средств электросвязи, начали отходить на второй план.

Якорь генератора З. Грамма имел кольцевую конструкцию, как и в машине А. Пачинотти. Немецкий электротехник Фридрих фон Хефнер-Альтенек заменил кольцевой якорь барабанным, что вдвое увеличило мощность электромашин и значительно упростило ее конструкцию.

Основа для создания электрических многофазных машин переменного тока была заложена в 1879 г. английским ученым Уильямом Бейли, который получил вращающееся магнитное поле посредством поочередного подключения обмоток четырех стержневых электромагнитов к источнику постоянного тока. Первые устройства, принцип работы которых был основан на свойствах вращающегося магнитного поля, были описаны в работах Марселя Дебре (Франция, 1880 — 1883) и Элиа Томсона (США, 1887 г.).

Первый двухфазный асинхронный двигатель был изобретен в 1888 г. хорватским инженером Николой Тесла. Однако из-за плохих пусковых характеристик этот тип двигателя практического применения не получил, несмотря на то что двухфазная система переменного тока была реализована на крупнейшей электростанции XIX в.

В том же году русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский построил трехфазный генератор переменного тока мощностью 2,2 кВт и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, представлявшим собой полый медный цилиндр. КПД первых асинхронных двигателей оказался значительно ниже, чем у аналогичных по мощности двигателей постоянного тока.

С 1889 г. Н. Тесла занимался исследованием свойств высоковольтных энергетических систем и токов высокой частоты, что привело к изобретению в 1891 г. высокочастотных трансформаторов (трансформаторов Тесла) и электромеханических генераторов высокой частоты.

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский получил патент на новую конструкцию короткозамкнутого ротора, получившего название «беличья клетка». Ротор был выполнен в виде стального цилиндра, а в просверленные по его периферии каналы были заложены медные стержни, которые электрически соединялись на лобовых частях ротора. Преимущество «беличьей клетки» перед медным ротором заключается в том, что наряду с малым электрическим сопротивле-



нием она имеет высокую магнитную проницаемость, т. е. низкое магнитное сопротивление, что повышает вращающий момент двигателя. Устройство «беличьей клетки» принципиально не изменилось вплоть до настоящего времени.

В 1890 г. М. О. Доливо-Добровольский запатентовал фазный ротор асинхронного двигателя, имеющий трехфазную обмотку с тем же числом секций, что и обмотка статора. Выводы обмотки фазного ротора соединяются через контактные кольца и щетки с пусковым реостатом. Фазный ротор позволяет значительно снизить пусковые токи и осуществлять плавное управление скоростью вращения.

Через два года М. О. Доливо-Добровольский предложил конструкцию ротора, названную «двойной беличьей клеткой». Такой ротор имеет существенно улучшенные пусковые характеристики. В 1898 г. французский инженер Поль Бушери усовершенствовал «двойную беличью клетку», после чего она начала широко применяться.

В 1891 г. на Всемирной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне М. О. Доливо-Добровольский продемонстрировал первую в мире трехфазную систему передачи электроэнергии на расстояние около 170 км и предложил использовать трехфазный переменный ток в промышленности. Электропривод постоянного тока был быстро вытеснен электроприводом трехфазного переменного тока. Однако в течение долгого времени машины постоянного тока широко использовались в электроприводах прокатных станов, сварочных генераторах, в транспортных системах типа генератор — двигатель, а также в качестве возбuditелей (источников магнитного потока) синхронных генераторов переменного тока. К концу XX в. машины постоянного тока стали утрачивать свое значение в последнем из упомянутых случаев; на смену им пришла ионная и полупроводниковая электроника.

В середине XX в. было установлено, что микродвигатели постоянного тока имеют более высокую точность и диапазон регулирования частоты вращения, чем микродвигатели переменного тока. После этого машины постоянного тока стали все более широко применяться в системах автоматического регулирования и в бытовых электрических устройствах.

Таким образом, машины постоянного и переменного токов постепенно заняли свои отдельные ниши; каждый из типов машин наиболее целесообразно применять в определенной области.

Наиболее важное применение машин переменного тока — выработка электроэнергии трехфазными синхронными генераторами: турбогенераторами на тепловых и атомных электростанциях и гидрогенераторами на гидроэлектростанциях. Синхронные генерато-

ры, имея сравнительно простую конструкцию, позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

Современные генераторы изготавливаются с бесщеточной системой возбуждения и автоматической электронной регулировкой напряжения. При размерах генераторов в несколько метров их важнейшие детали изготавливаются с точностью до миллиметра.

В России постоянно растет общая мощность генераторов, установленных на электростанциях, что соответствует росту потребности в электроэнергии. Так, в 1998 г. установленная мощность российских электростанций составляла 198 млн кВт, а в 2010 г. эту цифру намерено увеличить до 232 млн кВт, из них 25 млн кВт будет вырабатываться турбогенераторами на атомных электростанциях (АЭС), около 157 млн кВт — турбогенераторами на тепловых электростанциях (ТЭС), около 50 млн кВт — гидрогенераторами гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций (ГЭС и ГАЭС). Намеченные на период с 1999 по 2010 гг. вводы новых генерирующих мощностей на электростанциях с учетом замены оборудования, выработавшего свой ресурс, составят около 50 млн кВт.

Наконец, следует остановиться на асинхронизированных синхронных машинах, которые в последние годы все более широко осваиваются на российских электростанциях, в том числе на станциях ОАО «Мосэнерго». Разработка таких машин началась еще в 60-х гг. XX в. Существенный вклад в их разработку внес Михаил Моисеевич Ботвинник, доктор технических наук, известный всему миру как чемпион мира по шахматам. Асинхронизированные машины, или машины двойного питания, имеют раздельное питание обмоток статора и ротора, на которые подается напряжение разной частоты. Эти машины допускают несинхронные режимы работы. Основное преимущество асинхронизированных машин — это высокая, по сравнению с обычными синхронными машинами, устойчивость к выпадению из синхронизма, в том числе в режиме значительного потребления реактивной мощности. Свойства асинхронизированных машин наиболее ценны при работе в сложных энергосистемах.

**Сведения из истории трансформаторов.** Начало истории трансформаторов, после открытия Майклом Фарадеем явления электромагнитной индукции, можно связать с работами того же М. Фарадея и американского ученого Джозефа Генри, в которых впервые появились изображения будущего трансформатора (это было в 1831 г., т. е. в год открытия электромагнитной индукции). Однако ни тот, ни другой ученый не указали на такое свойство устройства, как способность изменять напряжение и ток.

В 1848 г. немецкий исследователь Генрих Даниель Румкорф изобрел индукционную катушку, которая явилась прообразом трансформатора.

Датой рождения первого трансформатора считается 30 ноября 1876 г., когда Павел Николаевич Яблочков получил патент на его изобретение. Трансформатор Яблочкова имел разомкнутый сердечник; он представлял собой стержень, на который наматывались обмотки.

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 г. братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсонами.

В 1885 г. американским инженером Вильямом Стенли был создан первый автотрансформатор.

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский построил первый трехфазный трансформатор.

В том же году Д. Свинберн предложил применить масляное охлаждение для сердечника и обмоток трансформатора.

В начале 1900-х гг. английский исследователь-металлург Роберт Хедфилд провел серию экспериментов для установления влияния различных добавок на свойства железа. Через несколько лет он поставил заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния.

1928 г. можно считать годом начала производства силовых трансформаторов в нашей стране, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии — Московский электрозавод).

Крупный скачок в технологии производства сердечников трансформаторов был сделан в начале 30-х гг. XX в., когда американский металлург Норман П. Гросс установил, что при комбинированном воздействии проката и нагревания у кремнистой стали появляются замечательные магнитные свойства в направлении проката: магнитная проницаемость возрастает в 5 раз, а потери на гистерезис сокращаются в 4 раза.

В настоящее время известны тысячи разнообразных конструкций трансформаторов — от миниатюрных до гигантских, для транспортировки которых требуются специальные железнодорожные платформы или мощные плавучие средства.

На большинстве энергетических объектов установлены масляные трансформаторы. Однако они взрывоопасны. Взрыв такого трансформатора приводит к пожарам из-за выброса горячего масла. Им на смену приходят взрывобезопасные сухие трансформаторы. Они не выделяют токсичных и коррозионных газов, экономичны и влагостойки.

Дальнейшее развитие трансформаторов связано, в частности, с применением новых классов магнитных материалов — аморфных и нанокристаллических сплавов. Сердечники, изготовленные из них, характеризуются весьма малыми потерями, высокими значениями начальной и максимальной магнитной проницаемости и индукции насыщения на высоких частотах. Уже сейчас аморфные сплавы получили широкое распространение в радиоэлектронной аппаратуре, широкополосных трансформаторах устройств связи, импульсных трансформаторах с мощностью импульса до десятков мегаватт при частотах от 0,5 МГц и выше, в измерительных трансформаторах тока и напряжения, в согласующих трансформаторах и т. д.

Огромные перспективы на пути увеличения мощности силовых трансформаторов открываются при использовании сверхпроводниковой технологии.

# МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

# I

## РАЗДЕЛ

- Глава 1. Общие вопросы
- Глава 2. Генераторы постоянного тока
- Глава 3. Двигатели постоянного тока

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### 1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Поступательное движение проводника в однородном магнитном поле.** Пусть между полюсами постоянного магнита поместили проводник перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (рис. 1.1). Будем считать, что в пределах полюсов магнитное поле однородно и характеризуется индукцией  $B$ , а за пределами полюсов поле отсутствует. На рис. 1.1 направление силовых линий магнитного поля (линий магнитной индукции) показано диагональными крестиками (линии входят в чертеж перпендикулярно ему), а область магнитного поля ограничена штриховой линией.

Пусть под действием внешней силы  $\vec{F}$  проводник перемещается со скоростью  $v$  перпендикулярно как силовым линиям магнитного поля, так и самому проводнику. Перемещение рассматриваемого проводника происходит, как показано на рис. 1.1, по двум параллельным проводам, как по направляющим. Известно, что если движущийся проводник пересекает силовые линии магнитного поля, то в этом проводнике наводится электродвижущая сила (ЭДС), называемая *ЭДС индукции*.

ЭДС индукции  $E$  зависит от индукции магнитного поля  $B$ , скорости движения проводника  $v$ , а также от *активной длины проводника*  $l$  (от длины участка проводника в пределах магнитного поля):

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

В таком виде выражение ЭДС справедливо в описанном ранее случае: активная часть проводника расположена перпендикулярно линиям магнитной индукции, а скорость движения проводника перпендикулярна самому проводнику и линиям магнитной индукции. Выражение (1.1) можно рассматривать как форму представления закона электромагнитной индукции.

Направление ЭДС индукции, возникающей в движущемся проводнике, определяют *по правилу правой руки*:

- ладонь располагают так, чтобы в нее под прямым углом входили силовые линии магнитного поля;
- большой палец, отогнутый под прямым углом к остальным четырем вытянутым пальцам, ориентируют в направлении скорости движения проводника;
- четыре пальца указывают направление ЭДС.

Если рассматриваемый проводник включить в замкнутую цепь, выходящую за пределы магнитного поля, то под действием ЭДС индукции по цепи потечет электрический ток. На рис. 1.1 эта цепь образована двумя параллельными проводами-направляющими и приемником энергии сопротивлением  $R$ . Направление тока  $I$  в замкнутой цепи совпадает с направлением ЭДС.

Итак, в рассматриваемом проводнике при его движении возникает электрический ток. Но на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует *электромагнитная сила*  $\vec{F}_{эм}$ , называемая также силой Ампера. В данных условиях, когда направление тока перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, величина электромагнитной силы определяется выражением

$$F_{эм} = BIl. \tag{1.2}$$

Направление электромагнитной силы определяют *по правилу левой руки*:

- ладонь левой руки располагают так, чтобы в нее под прямым углом входили силовые линии магнитного поля;
- четыре вытянутых пальца ориентируют в направлении тока;
- палец, отогнутый под прямым углом к остальным четырем пальцам, указывает направление электромагнитной силы.

Применив правило левой руки к рассматриваемому проводнику с током, выясняем, что сила  $\vec{F}_{эм}$  направлена против внешней силы  $\vec{F}$  (и против скорости движения проводника).

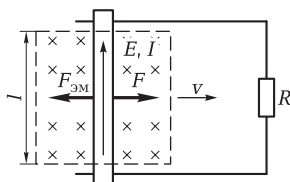


Рис. 1.1. Схема действия генератора

Согласно *второму закону Ньютона*, равнодействующая сил, действующих на тело, сообщает этому телу ускорение, пропорциональное равнодействующей. Если ускорение тела равно нулю (т. е. если скорость тела постоянна), то равнодействующая сил также равна нулю. В рассматриваемом случае, если скорость  $v$  проводника постоянна, равнодействующая внешней и электромагнитной силы равна нулю. Поскольку силы  $\vec{F}$  и  $\vec{F}_{\text{эм}}$  противоположно направлены, то указанное условие выполняется при равенстве модулей этих сил:

$$F = F_{\text{эм}}. \quad (1.3)$$

Итак, в рассматриваемой модели (см. рис. 1.1) существенны два процесса:

- возникновение тока под действием ЭДС индукции, наведенной в проводнике, который пересекает линии индукции магнитного поля;
- возникновение электромагнитной силы, действующей на проводник, в котором возник ток; направление этой силы противоположно внешней силе, перемещающей проводник.

Возникновение тормозящей электромагнитной силы, сопровождающей индукционный ток, свидетельствует о том, что *для выработки электрической энергии необходимо приложение внешней силы, преодолевающей электромагнитную силу*. Это согласуется с законом сохранения энергии. Явления, описанные ранее, иллюстрируют процесс превращения механической энергии в электрическую.

Перепишем равенство модулей сил (1.3) с учетом выражения (1.2):

$$F = BIl. \quad (1.4)$$

Из курса физики известно, что механическая мощность силы, действующей на тело в направлении его движения, может быть выражена как произведение этой силы на скорость движения:  $P_{\text{мех}} = Fv$ . (Напомним, что мощность выражает работу, произведенную силой за единицу времени.) Тогда, умножая обе части выражения (1.4) на скорость, получаем

$$P_{\text{мех}} = BIlv.$$

Поскольку, согласно формуле (1.1),  $E = Blv$ , имеем

$$P_{\text{мех}} = EI = P_{\text{эм}}, \quad (1.5)$$

где  $P_{\text{эм}}$  — *электромагнитная мощность*. (Вспомним из курса электротехники, что мощность источника электроэнергии выражается именно так:  $P_{\text{и}} = EI$ .)



Выражение (1.5) показывает, что *механическая мощность проводника при его движении в магнитном поле преобразуется в электромагнитную мощность.*

**Модель генератора постоянного тока.** Рассмотрим теперь, как описанные процессы используются в генераторе постоянного тока на примере простой модели, показанной на рис. 1.2, *а*. В поле постоянного магнита вращается с помощью какого-либо первичного двигателя якорь, состоящий из цилиндрического сердечника и размещенного на нем проводящего витка. В активных сторонах витка, расположенных вдоль полюсов, наводится ЭДС индукции. Показанное на рис. 1.2 направление ЭДС в каждой активной стороне определено по правилу правой руки с учетом направления силовых линий магнитного поля (оно отмечено штриховыми линиями со стрелками) и направления движения активной стороны (ЭДС, как и ток, обозначена строчной буквой по традиции обозначения мгновенного значения переменной величины). Когда активная сторона переходит при своем движении из области северного полюса *N* магнита в область южного полюса *S*, направление ЭДС в ней изменяется на противоположное (в области северного полюса ЭДС направлена на нас, а в области южного полюса — от нас).

График зависимости от времени мгновенного значения ЭДС одной из активных сторон витка показан на рис. 1.2, *б* (вверху). При надлежащей форме полюсных наконечников магнита эта зависимость синусоидальна:

$$e = E_m \sin \omega t = E_m \sin 2\pi f t, \quad (1.6)$$

где  $E_m$  — амплитуда ЭДС;  $\omega$  — угловая частота ЭДС, рад/с;  $f$  — частота ЭДС, Гц.

Мгновенное значение ЭДС становится равным амплитудному значению в момент прохождения активной стороной витка середины полюса (именно этот момент показан на рис. 1.2, *а*). Действительно, проводник пересекает линии магнитного поля с наибольшей частотой при прохождении им верхней (или нижней) точки. Нулевые же значения ЭДС принимает при движении активной стороны *вдоль* линий поля, а это имеет место, когда рамка расположена горизонтально (в рассматриваемой конфигурации).

Полный цикл изменения ЭДС происходит за один оборот якоря, поэтому частота ЭДС равна частоте вращения якоря, если частоту вращения измерять в оборотах в секунду, а частоту ЭДС — в герцах, т. е. в числе колебаний в секунду. Частоту вращения, однако, принято измерять *в оборотах в минуту* и обозначать буквой *n*. Тогда

$$n [\text{об/мин}] = 60f [\text{Гц}]. \quad (1.7)$$

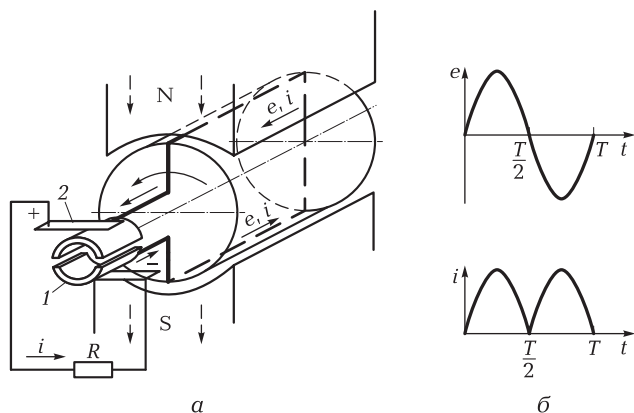


Рис. 1.2. Модель генератора постоянного тока:

*a* — устройство: 1 — полукольцо (коллекторная пластина); 2 — скользящий контакт (щетка); *б* — графики зависимости от времени ЭДС, индуцируемой в активной стороне витка, и тока нагрузки

Период изменения ЭДС ( $T$ , с) является величиной, обратной частоте ЭДС:  $T = 1/f$ . Заметим, что выражение (1.7) справедливо только в том случае, если электрическая машина имеет два полюса.

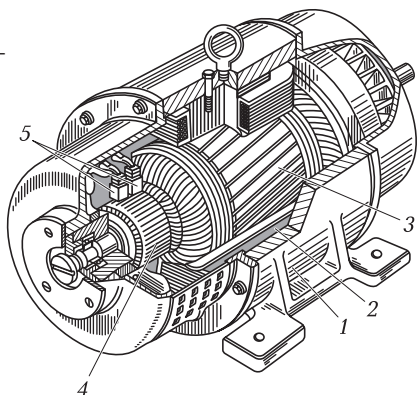
Для получения *неизменного по направлению тока*, питающего приемник энергии сопротивлением  $R$ , используется *коллектор*, который в рассматриваемой модели представлен двумя полукольцами 1, вращающимися на валу вместе с якорем. Цепь приемника соединяется с полукольцами посредством неподвижных скользящих контактов — *щеток* 2. Верхняя (по рисунку) щетка является положительной, так как ток течет по внешней цепи от нее; нижняя щетка — отрицательная: ток внешней цепи течет к ней. В процессе вращения якоря с каждой щеткой через полукольца контактирует то одна, то другая активная сторона витка, чем и обеспечивается неизменность направления тока во внешней цепи, в то время как ток каждой активной стороны изменяет направление каждые полпериода.

В момент, когда ЭДС в сторонах витка равны нулю, полукольца замыкаются щетками накоротко.

## 1.2. КОНСТРУКЦИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Основные части машины постоянного тока** показаны на рис. 1.3: статор 1 (неподвижная часть машины) включает в себя стальную станину, по которой замыкается магнитный поток машины, главные полюсы 2, создающие основной магнитный поток, а также

Рис. 1.3. Машина постоянного тока:  
1 — статор; 2 — полюс; 3 — якорь; 4 — коллектор; 5 — щеткодержатели со щетками



добавочные полюсы, не показанные на рис. 1.3. В якоре 3, вращающемся на валу от первичного двигателя, происходит превращение механической энергии в электрическую — работа машины в режиме генератора.

Если же первичный двигатель отсутствует, а обмотка якоря подключена к источнику постоянного напряжения, то происходит обратное превращение энергии, т. е. работа машины осуществляется в режиме двигателя. Вал удерживается в подшипниках, укрепленных в щитах станины. Коллектор 4, как и якорь, установлен на валу. Коллектор предназначен для преобразования переменного тока в постоянный. Электрическое соединение внешней цепи с пластинами коллектора происходит через неподвижные щетки, установленные в щеткодержателях 5.

Рассмотрим отдельные части машины более подробно.

**Полюсы и якорь.** На рис. 1.4 показаны главный и добавочный полюсы (назначение добавочных полюсов будет рассматриваться далее). Сердечники полюсов 1 делают *шихтованными*: их набирают из листов электротехнической стали, характеризующейся высокой магнитной проницаемостью. Толщина отдельного листа составляет 1...2 мм. Листы стянуты шпильками и изолированы между собой оксидной пленкой. Шихтованное устройство сердечников значительно ослабляет наводимые вихревые токи. Сердечники главных полюсов оканчиваются полюсными наконечниками, которые выполняют так, чтобы воздушный зазор между ними и якорем увеличивался от середины полюса к его краям. Это обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Величина воздушного зазора составляет менее 1,5 мм.

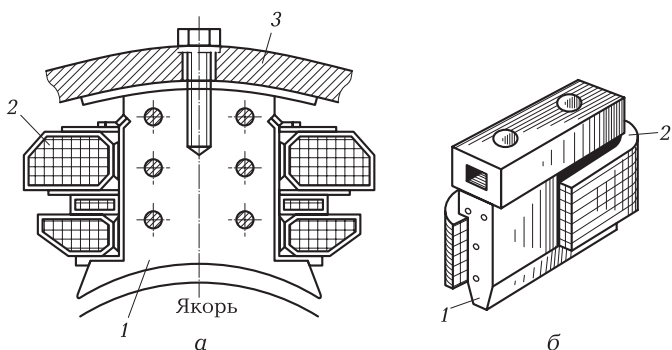


Рис. 1.4. Полюсы машины постоянного тока:

*а* — главный полюс; *б* — добавочный полюс; 1 — сердечник полюса с полюсным наконечником; 2 — полюсная катушка; 3 — станина

Полюсные катушки 2 выполняют из медного провода. Катушки изолируют от сердечника. На рис. 1.4, *а* показана катушка, разделенная по высоте на части. Между частями катушки оставляют вентиляционные каналы, что обеспечивает более интенсивное охлаждение катушки и сердечника в процессе работы.

По проводам катушек главных полюсов течет *ток возбуждения* магнитного поля. При *независимом возбуждении* машины постоянного тока для создания тока возбуждения используется отдельный источник постоянного напряжения малой мощности. При *самовозбуждении* генератора ток возбуждения является частью тока якоря. В различных схемах возбуждения двигателя один и тот же источник питает как обмотку якоря, так и обмотку возбуждения. Схемы возбуждения машин постоянного тока рассмотрены в гл. 2 и 3.

Полюсы крепятся к станине 3 с помощью болтов.

Якорь машины постоянного тока показан на рис. 1.5. Сердечник якоря (рис. 1.5, *а*) представляет собой цилиндр, имеющий, как и полюсы, шихтованную конструкцию: он набран из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы сердечника покрыты изоляционным лаком и имеют зубцы, пазы и вентиляционные отверстия (рис. 1.5, *б*). Пакет листов удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами. В пазах сердечника укладываются провода обмотки якоря (рис. 1.5, *в*), соединяемые друг с другом по определенным схемам, которые будут рассматриваться в последующих подразделах. Обмотка якоря изолируется от пазов и крепится в них клиньями (из текстолита или гетинакса) или бандажами (из проволоки или стеклоленты).