
ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины являются основными элементами энергетических и электрических установок. Их появление связано с именем английского ученого М. Фарадея, который в 1821 г. первым осуществил опыт, заставив вращаться вокруг магнита проволочку, по которой проходил электрический ток. В 1831 г. им было открыто явление электромагнитной индукции и построен первый электрический генератор.

Явление электромагнитной индукции характеризуется наведением ЭДС в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, а также возникновением электромагнитной силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по проводнику электрического тока. При движении проводника с током в магнитном поле с постоянной скоростью механическая и электромагнитная силы, действующие на проводник, уравновешены. Если при этом проводник перемещается в направлении электромагнитной силы, следовательно, против внешней механической силы, то работа, совершаемая электромагнитной силой, производится за счет энергии электромагнитного поля и покрывается источником электрической энергии. Так осуществляется преобразование электрической энергии в механическую. *Электрическая машина работает в режиме двигателя.*

Если движение проводника с током происходит в сторону, противоположную направлению электромагнитной силы, то движение может осуществляться только под

действием внешней механической силы. В этом случае работа, совершаемая механической силой, покрывается источником механической энергии. Так преобразуется механическая энергия в электрическую. Электрическая машина работает в режиме генератора.

Таким образом, электрической машине присуще свойство обратимости — она может работать и двигателем, и генератором.

До восьмидесятых годов XIX в. развитие электрических машин шло по пути совершенствования конструкций машин постоянного тока. В тот же период возникла необходимость передавать электроэнергию на расстояние. В 1882 г. были проведены опыты по передаче электроэнергии на постоянном токе при повышенном напряжении. Однако высокое напряжение генераторов постоянного тока ухудшало их работу и часто приводило к авариям. Кроме того, передаче энергии на большие расстояния препятствовало повышение напряжения генераторов сверх определенного предела, которое необходимо во избежание больших потерь в линии электропередачи. Непосредственное использование электрического тока высокого напряжения в ряде случаев оказалось бы невозможным и по условиям безопасности.

Все это усиливало интерес электротехников того времени к переменному току. Стало очевидным, что без переменного тока электротехника в дальнейшем развиваться не сможет.

В 1877 г. русский ученый П. Н. Яблочков, улучшая работу изобретенных им же «свечей Яблочкова», применил переменный ток, построив установку с последовательно соединенными индукционными катушками, вторичные обмотки которых питали свечи. Индукционные катушки представляли собой по существу первый в мире трансформатор. В 1882 г. такого рода трансформатор был усовершенствован русским изобретателем И. Ф. Усагиным.

Дальнейшим этапом развития электрических машин явились работы итальянского физика Г. Феррариса и изобретателя сербского происхождения Н. Теслы по исследо-

ванию полей переменного тока, которые послужили теоретической предпосылкой для создания двухфазного асинхронного двигателя с вращающимся магнитным полем. Такой двигатель Н. Тесла создал в 1888 г. Из-за ряда недостатков двухфазный двигатель не смог найти эффективного практического применения.

Решил задачу в пользу переменного тока наш соотечественник — электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский. В 1889 г. он предложил трехфазную систему токов, построив трехфазный двигатель. Доливо-Добровольскому удалось решить основные проблемы, связанные с конструкцией двигателя. Первой демонстрацией практического применения трехфазного двигателя с вращающимся магнитным полем, а также и трехфазной системы передачи электроэнергии стала Международная электротехническая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне. Простой и надежный трехфазный двигатель послужил стимулом для развития техники переменных токов и электроэнергетики в целом.

В 1894 г. англичане — братья Д. Гопкинсон и Э. Гопкинсон предложили трансформатор с замкнутым магнитопроводом, что послужило новым толчком для развития техники переменного тока и передачи его на значительные расстояния. С этого времени начинается бурный рост использования электрической энергии в различных отраслях промышленности. Одновременно с этим стала увеличиваться установленная мощность генераторов и трансформаторов.

В настоящее время генерирование, распределение и использование электроэнергии осуществляется в основном на переменном токе, и в энергетике наиболее распространены электрические машины переменного тока.

Большая часть электроэнергии производится на тепловых электростанциях, в которых энергия сгорающего топлива довольно сложным путем преобразуется в электрическую энергию. Согласно рисунку В.1, перегретый пар высокого давления из котельного агрегата 1 по паропроводу 2 попадает на рабочие лопатки паровой турбины 3. При расширении кинетическая энергия пара превращается

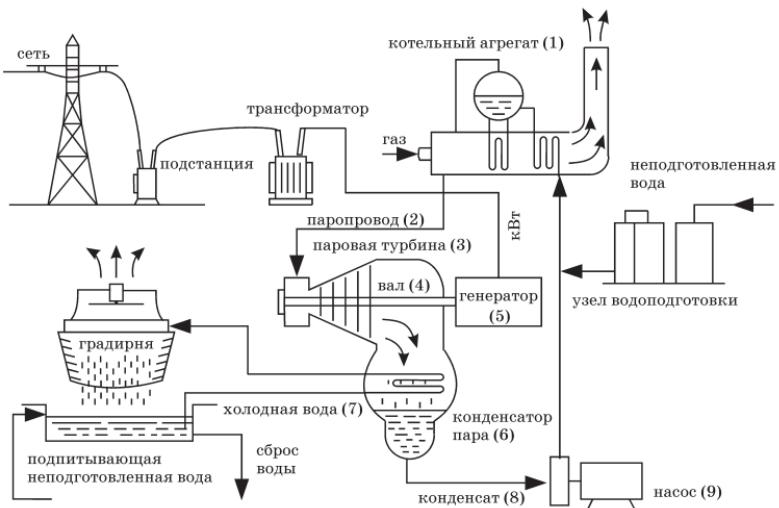


Рис. В.1
Структурная схема тепловой электростанции

в механическую энергию вращения ротора турбины, который расположен на одном валу 4 с электрогенератором 5. Отработанный пар из турбины направляется в конденсатор 6, в котором, охладившись до состояния воды путем теплообмена с циркуляционной водой 7 градирни или водохранилища, по трубопроводу 8 направляется насосом 9 обратно в котельный агрегат.

КПД преобразователя энергии — турбогенератора определяет, прежде всего, КПД паровой турбины, увеличение которого связано с повышением максимальной температуры пара. Но в турбине, испытывающей большие механические нагрузки, нельзя использовать температуру пара сверх определенного предела. Вследствие этого у лучших тепловых электростанций электрический КПД составляет не более 43–45%.

Возрастающую роль в производстве электроэнергии играют атомные электростанции (АЭС), у которых в качестве котельного агрегата служит атомный реактор с ядерными тепловыделяющими элементами. Электрический КПД атомных электростанций практически такой же, как и у обычных тепловых электростанций.

На отдельных тепловых электростанциях кроме АЭС и государственных районных электростанциях (ГРЭС) часть тепловой энергии утилизируют на теплоснабжение, что повышает КПД использования топлива.

Производство электроэнергии осуществляется также газопоршневыми (ГПЭС) и дизельными (ДЭС) электростанциями с приводом генераторов от двигателей внутреннего сгорания. Электрический КПД таких станций также не превышает 45 %.

Значительная доля электроэнергии вырабатывается и на гидроэлектростанциях (рис. В.2).

Мощность гидрогенераторов, у которых ротор генератора непосредственно соединен с валом рабочего колеса гидротурбины, определяет напор и расход воды равнинных или горных рек. В отличие от тепловых электростанций, электрический КПД гидрогенераторов гидроэлектростанций достигает 94–96 %.

Из других возможных методов преобразования энергии отметим магнитогидродинамический метод (МГД),

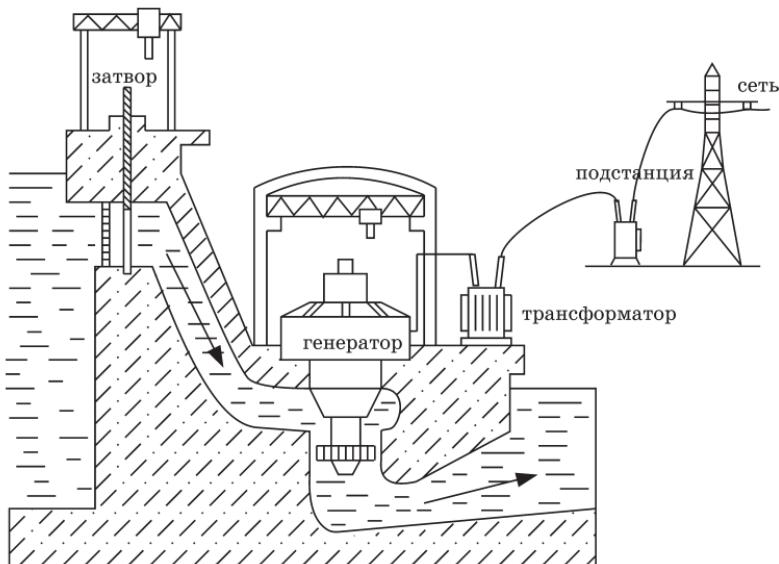


Рис. В.2
Структурная схема гидроэлектростанции

с помощью которого кинетическая энергия электропроводящего потока, ионизированного в результате сильного нагрева газа, движущегося с большой скоростью в поперечном магнитном поле, преобразуется в электрическую энергию. Установка, в которой происходит процесс преобразования энергии, называется МГД генератором. Он выполняет функции турбины и генератора. МГД метод может заметно повысить КПД тепловых станций, однако сложен в практической реализации. Прежде всего это связано с тем, что газ приобретает необходимую электропроводность только при очень высоких температурах в присутствии специальных легкоионизирующихся присадок. Вторая трудность связана с высокими требованиями к каналу, по которому протекает поток химически активных продуктов сгорания со скоростью до 1000 м/с и температурой более 2000°С.

В настоящее время усилия ученых многих стран направлены на создание прототипов реакторов для термоядерных электростанций, источниками энергии в которых служат ядра изотопов водорода. На основе термоядерных электростанций может быть решена энергетическая проблема, однако реакция термоядерного синтеза происходит лишь тогда, когда ядра сближаются на сверхмалые расстояния, преодолевая электростатическое отталкивание между собой. Практически это возможно, когда вещество нагрето до чрезвычайно высокой температуры. Кроме того, необходимо еще добиться, чтобы обладающая высокой энергией частица существовала определенное время, достаточное для взаимодействия с другими частицами. При очень высокой температуре вещество существует в виде ионизированного газа или плазмы. Таким образом, стоит задача создать плазму с возможно высокой концентрацией и возможно более длительным временем сохранения в ней быстрых частиц. Имеющиеся определенные успехи в исследованиях позволяют подойти к обоснованию и созданию экспериментальных прототипов термоядерных реакторов.

Передача электроэнергии является наиболее экономичной в случае, если она осуществляется при высоком

напряжении. По этой причине между электростанциями и потребителями происходит многократное преобразование электроэнергии с помощью повышающих и понижающих силовых трансформаторов. В зависимости от расстояния и передаваемой мощности, напряжение генераторов электростанций повышают до 110, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ. Далее на распределительных подстанциях напряжение понижают до 35, 10 или 6 кВ. Наконец, к потребителю электрическая энергия подводится напряжением 0,4 или 0,23 кВ (рис. В.3).

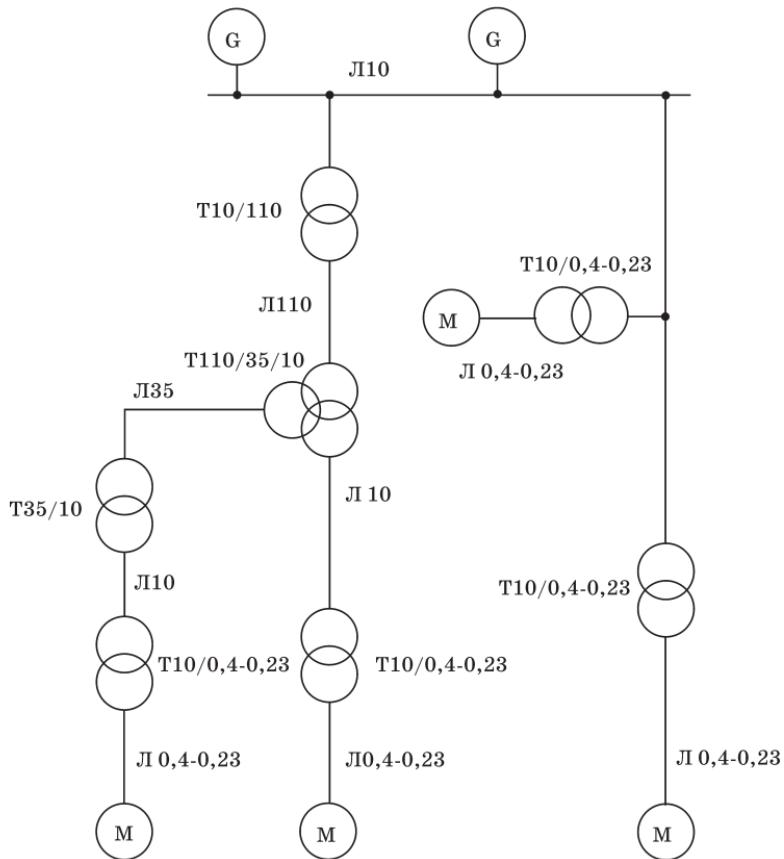


Рис. В.3
Примерная схема системы электроснабжения

Из изложенного следует, что производство электроэнергии еще в течение длительного времени будет базироваться на тепловой и гидравлической основе, а преобразователями энергии будут служить существующие типы генераторов, трансформаторов и электродвигателей.

Изучение основ теории электрических машин и трансформаторов, их устройства, принципа действия и основных характеристик составляет предмет настоящего учебника.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений: направление подготовки «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» и «Электроэнергетика и электротехника».

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Машиной постоянного тока называют электрическую машину, в которой процесс преобразования энергии обусловлен генерированием или потреблением постоянного тока. Генераторы постоянного тока питают цепи возбуждения турбогенераторов и гидрогенераторов электростанций, служат источниками тока при выполнении сварочных работ, для зарядки аккумуляторных батарей, входят в состав автомобильного электрооборудования и т. д. Применение двигателей постоянного тока объясняется их способностью обеспечить регулирование в широком диапазоне частоты вращения, высокое значение пускового момента при небольшой кратности пускового тока, большую перегрузочную способность.

Машина постоянного тока (рис. 1.1) состоит из литой стальной станины, прикрепленных к ней главных (основных) и добавочных полюсов, якоря со щеточно-коллекторным узлом. Опорой вращающегося якоря служат подшипниковые щиты. Сердечник якоря собирают из тонких 0,35–0,5 мм штампованных листов электротехнической стали с пазами для обмотки. Сердечники полюсов собирают из листовой

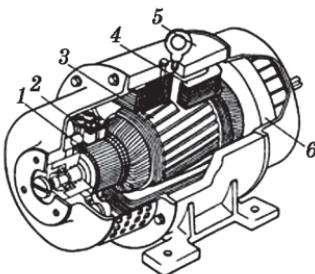


Рис. 1.1
Устройство машины
постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетодержатель со щетками; 3 — якорь с коммутатором в скосенных пазах; 4 — главный полюс с катушкой возбуждения; 5 — станина; 6 — вентилятор.

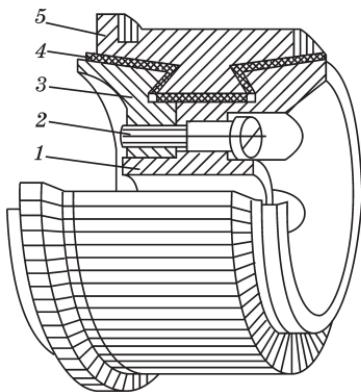


Рис. 1.2
Устройство коллектора:

1 — корпус; 2 — болт стяжной; 3 — кольцо нажимное; 4 — прокладка изоляционная; 5 — пластина коллекторная со шлицами.

пластин, изолированных одна от другой термостойкими прокладками из микарита (рис. 1.2). Соединение концов катушек обмотки якоря с пластинами коллектора выполняется методом пайки в шлицах коллекторных пластин.

Зубчатое строение поверхности якоря является причиной появления продольных и поперечных пульсаций магнитного поля в воздушном зазоре между наконечни-

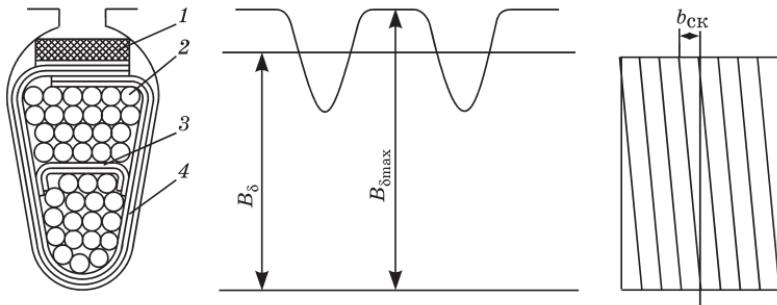


Рис. 1.3
Вид полуоткрытого паза якоря:

1 — клин из гетинакса; 2 — провод обмоточный; 3, 4 — прокладка межслойевая и пазовая изоляция из пленкостеклопластика, индукция в воздушном зазоре и скос пазов якоря.

стали толщиной 1–2 мм. Ток катушек возбуждения главных полюсов создает основной магнитный поток Φ . Ток катушек добавочных полюсов, расположенных по поперечной оси машины, создает поток Φ_d , способствующий безыскровой работе щеточно-коллекторного узла.

Обмотку якоря в машинах мощностью до 40 кВт выполняют из круглого медного провода, в машинах большей мощности — из прямоугольного провода. Коллектор имеет строго цилиндрическую форму и состоит из медных

ками главных полюсов и якорем, следовательно, и пульсации ЭДС в катушках обмотки якоря. Продольные пульсации исключают выбором нечетного соотношения зубцов якоря с числом пар полюсов машины Z/p , а заметное проявление ЭДС от поперечных пульсаций исключают скосом пазов якоря на $b_{ск} \approx \pi D_a/Z$, где D_a — диаметр якоря (рис. 1.3).

Для выявления принципа действия машины постоянного тока рассмотрим вращение катушки (секции) с w_k витками с постоянной угловой скоростью ω_2 в однородном магнитном поле (на рисунке 1.4 катушка представлена в одновитковом исполнении, коллектор — в виде двух полуколец). Если принять, что в начальный момент стороны катушки расположены на поперечной оси относительно основных полюсов, то потокосцепление катушки будет изменяться в зависимости от угла поворота $\alpha = \omega_2 t$ по закону $\psi_\alpha = w_k \Phi \cos \alpha = w_k \Phi \cos \omega_2 t$. В машине на p пар полюсов круговая частота электромагнитных колебаний ω связана с угловой скоростью якоря ω_2 соотношением $\omega = \omega_2 p$. Поэтому в общем виде:

$$\psi_\alpha = w_k \Phi \cos \omega_2 p t = w_k \Phi \cos \omega t.$$

В катушке наводится ЭДС

$$e_k = -\frac{d\psi_\alpha}{dt} = w_k \Phi \omega \sin \omega t = w_k \Phi \omega_2 p \sin \omega t = E_{km} \sin \omega t,$$

где $E_{km} = w_k \Phi \omega_2 p$ — амплитуда ЭДС катушки.

Направление ЭДС в сторонах катушки определяют по известному правилу правой руки. Выпрямление ЭДС осуществляется с помощью коллектора и щеток.

При прохождении сторон катушек поперечной оси каждая из сторон попадает в зону действия другого полюса, и ЭДС в сторонах катушек изменит знак. В это же

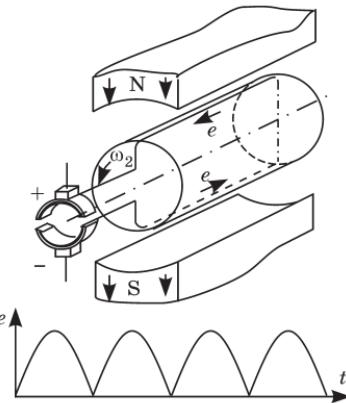


Рис. 1.4
Вид генерируемой ЭДС катушки

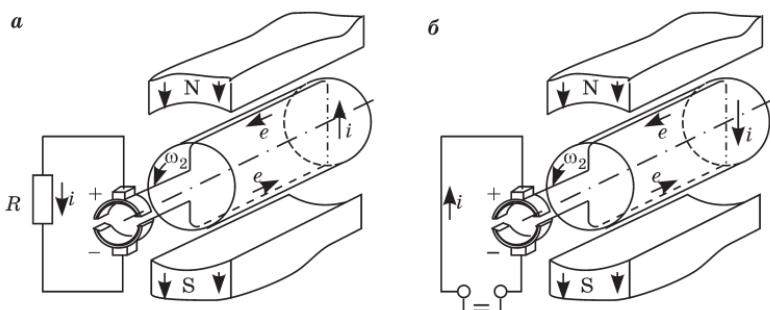


Рис. 1.5
Принципиальные схемы генератора (а) и двигателя (б)

самое время каждое полукольцо условного коллектора покидает щетку, с которой оно соприкасалось до подхода сторон катушки к поперечной оси, и начинает соприкасаться с другой щеткой. Таким образом, знак ЭДС на щетках не изменится. Щетки замыкают катушку в тот момент, когда ЭДС в ней имеет практически нулевое значение.

При включении на щетки нагрузки в цепи потечет выпрямленный ток, направление которого совпадает с направлением ЭДС (рис. 1.5а). Используя известное правило левой руки, можно определить направление электромагнитных сил, действующих на проводники катушки с током. Эти силы всегда направлены навстречу действию внешних сил, приводящих катушку во вращение. Так принципиально работает машина постоянного тока в режиме генератора.

Если при том же направлении потока Φ и прежней маркировке щеток к неподвижной катушке подвести напряжение от внешней сети (рис. 1.5б), то под действием электромагнитных сил катушка придет во вращение. Направление вращения и направление наведенной в катушке ЭДС останутся такими же, как и при работе машины в

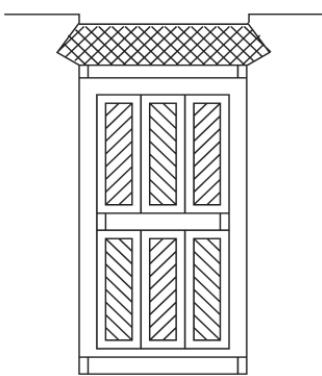


Рис. 1.6
Элементарные пазы якоря

качестве генератора. Так принципиально работает машина постоянного тока в режиме двигателя.

Заметную пульсацию ЭДС якоря от основного потока исключают большим числом катушек S якорной обмотки, которое всегда равно числу коллекторных пластин K и числу элементарных пазов Z_3 якоря, $S = Z_3 = K$. Образование элементарных пазов (рис. 1.6, в пазу три элементарных паза) объясняется невозможностью по условиям механической прочности зубцов штамповывать в сердечнике якоря большое число реальных пазов.

1.2. ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Обмотки якоря по виду и по способу соединения катушек делятся на петлевые, волновые и комбинированные обмотки.

У простой петлевой обмотки на число полюсов $2p$ концы каждой катушки припаяны к двум рядом лежащим коллекторным пластинам (рис. 1.7, 1.8).

Первый частичный шаг y_1 — расстояние между сторонами катушки в элементарных пазах равен полюсному делению $y_1 = \tau = Z_3/2p$. Если $Z_3/2p$ не целое число, то шаг

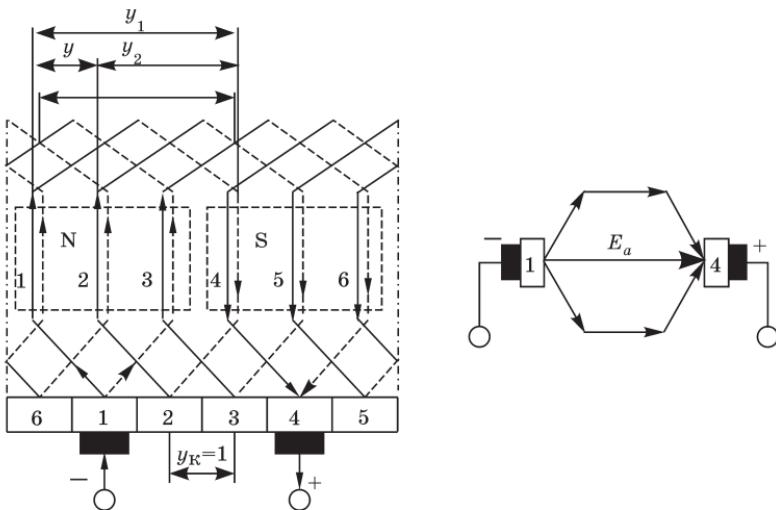


Рис. 1.7
Схема двухполюсной простой петлевой обмотки

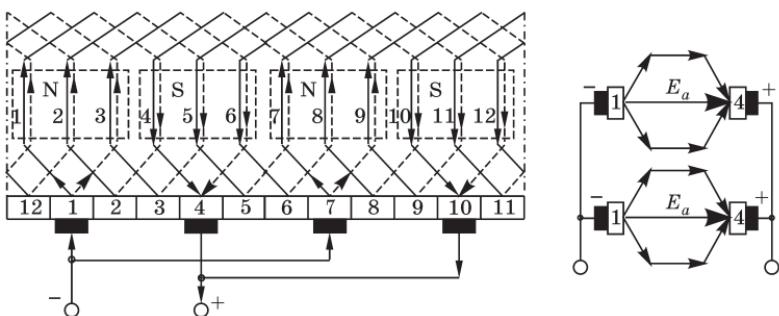


Рис. 1.8
Схема четырехполюсной простой петлевой обмотки

округляется до ближайшего целого числа. Результирующий шаг y представляет расстояние между одноименными сторонами двух следующих друг за другом катушек. Вторым частичным шагом y_2 называют расстояние между правой стороной катушки и левой стороной следующей по схеме катушки $y_2 = y_1 - y$. Шаг по коллектору $y_k = y = 1$.

Щетками обмотка якоря делится на параллельные ветви. Число параллельных ветвей простой петлевой обмотки $2a = 2p$. Щетки накладываются на коллекторные пластины, в которых наблюдается расхождение и схождение ЭДС параллельных ветвей. Только в этом случае ЭДС якоря, представляющая собой геометрическую сумму амплитуд ЭДС E_{km} всех катушек, входящих в параллельную ветвь, будет наибольшей. При таком расположении щетки периодически замыкают накоротко катушки, стороны которых лежат в зонах с ЭДС практически равной нулю.

При вращении якоря катушки относительно неподвижных щеток поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую, однако положение начал и концов параллельных ветвей обмотки относительно щеток при этом не изменяется. На схемах щетки показывают расположеными на поперечной оси машины, подчеркивая тем самым, что щетки наложены на коллекторные пластины, к которым припаяны катушки, стороны которых расположены на поперечной оси.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru