

**В.Е. ВЫСОЦКИЙ**  
**В.Я. ГОРЯЧЕВ, П.В. ТУЛУПОВ**

**МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.  
ТЕЗАУРУС, ВОПРОСЫ, ЗАДАЧИ**

**Учебное пособие**

**Самара**  
**Самарский государственный технический университет**  
**2009**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра электромеханики и автомобильного электрооборудования,  
теоретической и общей электротехники

В.Е. ВЫСОЦКИЙ  
В.Я. ГОРЯЧЕВ, П.В. ТУЛУПОВ

# МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ТЕЗАУРУС, ВОПРОСЫ, ЗАДАЧИ

*Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2009

УДК 621. 313

В 93

Рецензенты: зав. кафедрой электротехники СГАУ, д-р техн. наук, проф.  
Н.Е. Коныхов,

канд. техн. наук, доц. кафедры «Основы конструирования и технологии радиотехнических систем» ПГАТИ О.М. Артамонова

**Высоцкий В.Е.**

**В 93 Машины постоянного тока. Тезаурус, вопросы, задачи:** учеб. пособ. /  
*В.Е. Высоцкий, В.Я. Горячев, П.В. Тулунов.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009.  
– 259 с.: ил.

ISBN 978-5-7964-1295-4

Рассмотрены машины постоянного тока. Описаны их принцип действия и конструкции, приведены расчеты, схемы, типовые задачи. Даны рекомендации по самостоятельному изучению материала и задания по работе с книгой, а также тезаурус по каждой теме.

Пособие предназначено для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов (очной, заочной и дистанционной форм обучения) по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Электромеханика».

УДК 621. 313

В 93

ISBN 978-5-7964-1295-4

© В.Е. Высоцкий, В.Я. Горячев,  
П.В. Тулунов, 2009

© Самарский государственный  
технический университет, 2009

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебной программой курсов «Электрические машины», «Электро-механика» предусмотрена как работа в аудитории, так и самостоятельная работа студента. Для теоретического и практического освоения материала при аудиторной и самостоятельной работе и предназначено данное пособие. При создании пособия авторы исходили из того, что при достаточном количестве учебников в библиотеке вуза из-за неумения или нежелания студента работать с книгой не обеспечивается должное качество подготовки специалиста. Между тем нужна учебная литература, которая разъясняла бы основные понятия по предмету, систематизировала учебный материал и помогла бы студенту приобрести необходимый багаж знаний. Этим была обусловлена необходимость подготовки информационно-методических материалов для самостоятельной работы студента при изучении дисциплин «Электрические машины», «Электро-механика». Теоретический материал представлен в пособии в виде перечня терминов, понятий, сокращений; приводится список литературы, рекомендуемой для углубленной проработки темы. При этом каждая глава пособия содержит вводную часть, где формулируются цели изучения темы, приводится характеристика рассматриваемых проблем, а также ссылки на библиографический список. Затем следует изложение материала, приводятся примеры, иллюстрирующие связь теории с практикой, даются рекомендации для самостоятельной работы, вопросы для самоконтроля.

Авторы считают, что только в результате самостоятельного обучения можно приобрести умение понять текст, переосмыслить постановку типовых вопросов. При самостоятельной работе, анализируя учебные тексты, студенты могут составить по образцу рациональные алгоритмы для решения типовых задач, осмыслить и чётко изложить в конспекте теоретические вопросы, рассмотренные в литературе.

Задачей пособия является в первую очередь пробуждение у каждого изучающего основы электро-механики интереса к этому предмету. Авторы стремятся вовлечь каждого читателя в активную, осознанную

самостоятельную работу над текстом пособия и помочь каждому серьёзно обучающемуся приобрести базовые знания по электромеханике.

Структура, содержание и методика изложения материала подчинены задаче стимулирования навыков самостоятельной работы.

Основой глубоких и долговременных знаний является систематическая самостоятельная работа студента по предмету, равномерно в течение всего семестра, и не заучивание законов, формул, методик расчета и т. п., а активное применение их в анализе и решении практических задач.

Выявить знания можно только с помощью вопросов и задач, в которых отражены теория и практика данного предмета.

Это пособие может служить планом-путеводителем, помогающим студентам в их самостоятельной работе как на аудиторных занятиях, так и во внеаудиторное время.

Учебное пособие адресовано студентам электротехнических специальностей учреждений высшего профессионального образования и предназначено для глубокой самостоятельной проработки и самоконтроля. Оно также может быть полезно специалистам, желающим расширить свои познания в области электрических машин и электромеханики.

Пособие, естественно, не лишено недостатков, поэтому все критические замечания и предложения по его совершенствованию авторы примут с благодарностью.

# ВВЕДЕНИЕ

## ЦЕЛИ И ОСОБЕННОСТИ ПОСОБИЯ

Учиться легче, если хорошо преподают. При этом передачу другим людям самостоятельно добытых истин (или заблуждений) также можно назвать преподаванием. Психология и педагогика усердно занимаются совершенствованием процесса преподавания, но не менее важно научить и самого студента такой работе с любым учебным материалом (неважно, в какой форме он изложен – в устной или письменной), которая дала бы ему тот же результат, что и при хорошем преподавании.

Зачастую ценный учебный материал плохо усваивается из-за плохого изложения, так как яркий преподаватель и одаренный ученый в одном лице – явление редкое. Студенты окажутся в лучшем положении, если не будут зависеть от того, умеет талантливый ученый хорошо преподавать или нет.

Целью данного пособия является предоставление в распоряжение каждого, кто решил овладеть основами знаний в области электромеханики, системы учебных текстов по следующим темам дисциплины «Электрические машины»: конструкция, принцип действия, магнитная и электрическая цепи машины постоянного тока, магнитное поле и коммутация машины постоянного тока, генераторы и двигатели постоянного тока.

Учебная дисциплина «Электрические машины» является одной из основополагающих в общей системе подготовки инженеров-электромехаников. Целью изучения дисциплины является получение теоретических и практических знаний о процессах электромеханического преобразования энергии. Предметом изучения является электрическая машина, представляющая собой основное звено в современной электроэнергетической установке. Изучение электрической машины дает полное и четкое представление об объекте автоматизации, его рабочих характеристиках, регулировочных свойствах, энергетическом балансе, без которого не могут быть в дальнейшем усвоены профилирующие дисциплины.

Задачей изучения дисциплины является познание: принципа действия и устройства различных типов электрических машин и трансформаторов; физических явлений, происходящих в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах, и их математического описания; основных характеристик электрических машин и трансформаторов.

Студенты, успешно освоившие данную учебную дисциплину, должны знать:

- основные законы и процессы электромеханического преобразования энергии;
- возможные энергетические режимы работы электрических машин;
- физическую сущность процессов, определяющих установившиеся режимы работы электрических машин и трансформаторов;
- устройство обмоток электрических машин;
- МДС, магнитные поля, ЭДС и параметры обмоток;
- способы подключения генераторов электрической энергии к сети и способы пуска электрических двигателей.

Студенты должны уметь:

- описывать уравнениями электрического и магнитного равновесия исследуемый установившийся режим работы электрической машины;
- заменять физические образы электрических машин энергетически эквивалентными электрическими схемами замещения;
- строить векторные диаграммы напряжений и токов;
- пускать в ход двигатели постоянного и переменного тока;
- выбирать электрические машины и трансформаторы для конкретных условий эксплуатации;
- составлять развернутые схемы укладки обмоток электрических машин постоянного и переменного тока;
- использовать методы решения прикладных задач фундаментальных и общинженерных наук при выполнении расчетов по созданию основных типов электрических машин, трансформаторов;
- использовать современную вычислительную технику для расчетов, электромеханических устройств;

– выбирать тип электромеханического преобразователя для конкретного электропривода.

Успешность освоения студентами учебной дисциплины «Электрические машины» обеспечивается знаниями, полученными в ходе изучения курсов «Физика», «Математика», «Теоретические основы электротехники». Курс «Электрические машины», используя известные законы электричества и магнетизма, преломляет их на практике, на этой основе рассматривая теорию процессов электромеханического преобразования энергии. При изучении устройства и режимов работы электрических машин необходимы также знания по инженерной графике, электротехническим материалам, прикладной механике, силовой электронике, основам метрологии.

Машины постоянного тока (МПТ) являются объектом изучения в трех частях пособия.

В первой части пособия рассматриваются принцип действия и конструкции машины постоянного тока, расчет магнитной цепи МПТ, влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока, теория коммутации и описание главной электрической цепи, т.е. схем обмоток якоря МПТ.

Во второй части пособия рассматриваются генераторы постоянного тока, в третьей части – двигатели постоянного тока.

Достижению поставленных выше целей служит предлагаемая в пособии последовательность изучения теоретических основ.

Предлагается следующая структура основных разделов учебно-методического пособия:

- основные вопросы изучаемой темы;
- цели и задачи изучения темы;
- задания по работе с книгой;
- типовые задачи темы;
- тезаурус понятий темы;
- контрольные задачи темы;
- вопросы для самоконтроля.

Таким образом, изучение каждого раздела следует начинать с простого примера или реальной задачи, на этой основе переходить к теоретическому обобщению, которое иллюстрируется новыми примерами. В конце каждого раздела приводится система упражнений, связанных с теорией, их цель – углубление понимания и выработка навыков.

Во всех разделах данного пособия описываются цели обучения, сформулированные как положения, вопросы и задачи, которые должны уметь решать студенты после завершения изучения каждого раздела. Знание этих целей помогает студентам осуществлять самоконтроль при изучении курса.

Текст пособия соответствует темам или занятиям (в зависимости от количества часов, выделяемых на изучаемую дисциплину учебным планом). Таким образом, в структурном отношении пособие – руководство представляет собой совокупность текстов, расположенных в определенной последовательности, в которых для студентов формулируется цель занятия, ставятся задачи. Эти задачи он должен научиться решать в рамках данной темы (раздела). Далее рассматриваются необходимые теоретические предпосылки для решения целевых задач, приводятся алгоритмы и примеры решения типовых задач. Пособие вовлекает студентов в самостоятельную работу, предусматривающую овладение полученной информацией и её применение в процессе решения задач. Кроме того, в учебные тексты включены вопросы, задания для самостоятельной работы по основам электромеханики и даны комментарии, ответы, соответствующие решения для самоконтроля.

Остановимся на некоторых особенностях методики представления объектно-предметного содержания в пособии.

При изложении материала авторы придерживались принципа *qui vidit – bis legit* («кто видит, тот дважды читает»). У большинства обучающихся зрительная память развита лучше словесной. Рисунок или простой эскиз говорит им гораздо больше, чем несколько страниц объяснений, поэтому многие положения, приводимые в тексте, сопровождаются иллюстрациями.

Теоретический материал в пособии представлен нетрадиционно, что должно помочь студенту подобрать необходимый для усвоения материал. Этому способствует представление тезауруса понятий раздела, темы, необходимого для закрепления пройденного материала и свободной «навигации» в учебной литературе. Для полноты тезаурус содержит междисциплинарные термины и термины из смежных дисциплин. При составлении тезауруса использовалась известная книга Х. Шпанненберга [8]. Структура тезауруса по электромеханике включает несколько разделов – рубрик, основными из которых являются следующие: основные законы, используемые при расчете магнитных и электрических цепей; схемно-конструктивные особенности электромеханических преобразователей, характеристики и параметры электрических машин, режимы работы, измерения электрических и магнитных величин, характеристики электротехнических материалов. Весьма полезным приложением к тезаурусу может быть список стандартных обозначений величин, использующихся в электромеханике.

Особенностью содержания пособия является и то, что уже в начале работы с пособием студент знает, что должно быть на «выходе», и чётко представляет, что он должен знать и уметь. При этом объектно-предметное содержание знаний в пособии предполагает прежде всего раскрытие «технологии» овладения материалом. Это отражается в подборе, расположении и разборе решений определённых, наиболее распространённых типов задач, приёмов конспектирования литературы и т.п. Ориентировочная компонента учебной деятельности проявляется в заданиях, предусматривающих поиск студентом нужного вопроса в предлагаемой литературе из библиографического списка.

Работа с таким пособием осуществляется студентом индивидуально на аудиторном занятии или во внеурочное время. Студенты читают тексты пособия, конспектируют и анализируют описанные решения, пытаются осмыслить теоретические понятия, понять логику алгоритмов. Вся эта работа ведётся в индивидуальном для каждого студента темпе, что позволяет ему осмысленно и эффективно выполнять необходимые расчёты, самостоятельно решать новые варианты

типовых задач, консультироваться, если необходимо, с преподавателем. Если работа с пособием ведется в аудитории, то преподаватель в процессе личного контакта направляет работу тех студентов, которые испытывают те или иные затруднения.

Работа студента над текстом пособия не регламентируется обязательной проработкой определенного количества страниц за время одного занятия. На очередном занятии студент продолжает изучение материала с того места, где закончилась его работа на предыдущем занятии. Так осуществляется неразрывная связь последующего с предыдущим, повышается осмысленность деятельности, приобретает опыт углубленной систематической работы с печатным текстом. Темп работы с текстом пособия определяется самим студентом. Однако то обстоятельство, что в течение семестра должно быть изучено заданное число разделов дисциплины, требует от каждого студента планирования темпа своей работы. Он должен успеть освоить всю учебную программу к положенному сроку. Кроме того, от студента требуется самодисциплина, определяющая интенсивность его работы с текстом пособия.

При этом каждый студент учится (а преподаватель стремится оказать ему в этом соответствующую помощь) правильно организовывать свою самостоятельную работу с учебным материалом, планировать её этапы и распределять рабочее время, с тем, чтобы в установленный срок и с надлежащим качеством усвоить данный учебный материал.

Преподаватель может предложить студенту найти главу и параграф, в которых содержится материал по тому или иному вопросу, выделить ключевые моменты текста (о чём говорится, что говорится), сравнить, установить сходство и отличия в трактовке этого вопроса в данном пособии и в учебнике или решить задачу по образцу решения одной из задач (определить, какой именно) настоящего пособия и т.п. Выполнение заданий, предусматривающих сравнение материала по той или иной теме в различных учебниках, позволит преподавателю определить подходящий для конкретного студента стиль обучения.

Для контроля знаний может применяться и тезаурус. При этом обучаемый получает описание структуры тезауруса (указывается приблизительное число дескрипторов и терминов, которые должны

войти в тезаурус). Контрольное задание заключается в самостоятельном составлении тезауруса по изученной предметной области. Преподаватель оценивает самостоятельную работу студента, используя свои знания как знания эксперта.

Вопросы для самоконтроля требуют выполнения действий, которые необходимы для формирования необходимых навыков. Они построены на оценке причин возникновения неисправностей в машинах постоянного тока и ориентированы на практическую и профессиональную применимость усвоенных знаний с возможностью интеграции образования и производства.

В главах 4-8 пособия после теоретического материала приводятся задачи, которые рекомендуется решить во внеаудиторное время для закрепления приобретённых знаний и умений, а также задание по изучению текстов учебных пособий при подготовке к последующему занятию.

## **Глава 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С ПОСОБИЕМ**

### **1.1. САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ОСВОЕНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА КАК СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ**

Овладение знаниями осуществляется по дидактическим законам, суть которых сводится к следующему.

1. Всякий, кто желает развиваться и овладевать знаниями, должен достигать этого своим собственным трудом, собственным напряжением воли, с собственной настойчивостью, целеустремлённостью, вниманием и добросовестностью. Извне можно получить только информацию и побуждение.

2. Для успешной познавательной деятельности необходимо осознание и принятие цели деятельности, чёткое представление о том результате, который желательно получить, а также о тех методах и

средствах, использование которых необходимо для достижения поставленной цели.

В соответствии с этим процесс изучения учебного материала делится на следующие этапы:

1. Ознакомление с целями изучения.
2. Изучение основ теории и методов решения типовых задач.
3. Использование типовых способов и методов для решения задач профессиональной деятельности.

Наиболее важным этапом познания является второй – этап критического осмысления основных теоретических построений, уяснения тех приёмов и методов применения теоретических знаний к решению типовых задач, которые являются наиболее рациональными и эффективными. При этом обучающийся постигает логику и методологию той деятельности, которая должна составить основу его профессиональной квалификации.

Построить собственный «инструмент» мышления можно только в результате самостоятельной, осознанной, активной и целенаправленной работы над текстами.

При работе с данным пособием нужно следовать всем указаниям, приведенным в тексте, и стремиться к усвоению принятой в литературе по электрическим машинам символики и терминологии. Обучающиеся должны овладеть основами теории, методами составления и анализа схем и моделей. Следует изучить способы записи уравнений и методы решения систем уравнений. Во время обучения необходимо анализировать соотношения и зависимости между различными электрическими и неэлектрическими величинами.

Необходимо изучить и освоить методы определения характеристик и режимов работы типовых электромеханических устройств постоянного тока, а также ознакомиться и научиться пользоваться справочниками, каталогами – паспортами, инструкциями, техническими описаниями этих изделий.

При работе с пособием рекомендуется вести рабочую тетрадь, непременно используя чертёжно-графический инструмент и вычислительные средства (калькуляторы или компьютеры).

Записи в рабочую тетрадь следует делать только после соответствующих указаний в тексте пособия и после того, как конкретный материал осмыслен и усвоен.

**НЕ ПЕРЕПИСЫВАЙТЕ ВСЁ ПОДРЯД** – это только создаёт видимость работы, но не способствует эффективному овладению учебным материалом.

Первая часть вашей работы по изучению каждого раздела пособия должна быть полностью посвящена знакомству с целями изучения и овладению основами теории.

Для закрепления изученного материала служит тезаурус темы.

Тезаурус – это концентрированная информация, представленная в виде словаря терминов, содержащего достаточно полный набор понятий, являющийся той базой, на основе которой вместе с фактами, моделями и схемами формируются в дальнейшем знания по изучаемой учебной дисциплине, а также алгоритмы интеллектуальной деятельности, составляющие умения.

Основной информационной единицей тезауруса является термин, снабженный определением и текстовой или иллюстративной частью, дающей развернутое толкование термина. Для конкретизации и расширения смысла некоторых терминов используются дублирующие определения.

Часть определений к терминам приводится из соответствующих стандартов, отраслевых нормалей и технических условий. Благодаря этому при использовании тезауруса можно ознакомиться с таким толкованием термина, которое предусмотрено в технической документации.

Включение в тезаурусы сведений об основных электрических и магнитных величинах позволяет студенту освежить свои знания в области электротехники, придает тезаурусам характер технического справочника и делает их более удобными для использования.

Каждый термин снабжен определением и текстовой частью, раскрывающей более подробно его суть. В текстовой части термины в ряде случаев приводятся в сокращенном виде. Если суть какого-либо термина раскрыта в текстовой части другого термина, то делается ссылка на соответствующий термин.

Тезаурус содержит перечень понятий, терминов с заданными смысловыми отношениями между ними. Элементами, между которыми устанавливаются семантические соответствия, являются дескрипторы («описатели»), имеющие форму слов или словосочетаний. Перечень дескрипторов в тезаурусах упорядочен по алфавитному и систематическому принципу. Каждая словарная статья тезауруса, помимо основного элемента, может содержать ссылки на другие дескрипторы или понятия (в этом случае они выделяются полужирным шрифтом).

Тезаурус является полезным приложением к теоретическому материалу учебников. Он позволяет студенту систематизировать знания, полученные при ознакомлении с теоретическим материалом, а также быстро найти интересующие его новые понятия и изучить основные связи этих понятий с другими. Для этого в дескрипторную статью вводится ссылка на источник из библиографического списка, в котором излагается материал, связанный с данным дескриптором.

Следующим этапом работы с пособием является применение теоретических основ к решению типовых задач. При этом рекомендуется следующее.

1. Уяснить и записать в рабочую тетрадь цели и задачи по каждой теме.
2. Изучить общий подход к решению поставленной задачи по рекомендуемой литературе и записать алгоритм её решения.
3. Изучить пример решения варианта этой задачи (п. 2 и 3 можно поменять местами).
4. Решить самостоятельно ещё один вариант задачи.
5. Продолжить изучение.

Материалы для самостоятельной работы имеют то преимущество, что можно работать с ними в удобном темпе не только на ауди-

торных занятиях, но и в любое другое время, в любом месте по своему выбору. Эти материалы рассчитаны на активную работу, поскольку они предназначены не только для прочтения. Приведенные ниже рекомендации помогут использовать материалы для самостоятельной работы с максимальной эффективностью.

1. Прежде чем приниматься за изучение материалов для самостоятельной работы, нужно определить, предусматривают ли они наличие каких-либо навыков. Информация об этом обычно имеется там, где формулируются цели изучения предыдущих тем.

2. Следует обратить особое внимание на цели обучения и постоянно возвращаться к ним, следя за собственным продвижением на пути к их достижению. Формулировка цели обычно начинается с фразы типа: «Завершив изучение этой темы, вы должны уметь...»

3. Особенно полезны для самостоятельной работы разделы «активного» типа, содержащие задания, которые нужно выполнять по мере их проработки. Эти разделы называются «Вопросы для самопроверки». Как бы вам ни хотелось их пропустить и читать дальше, не делайте этого! Даже если вы думаете, что знаете ответы, запишите их и сравните с приведёнными в рекомендуемой литературе. Если ответ неверен, то определите, в чём была допущена ошибка.

4. Встретив непонятное для вас место, не бейтесь над ним долго. Загляните немного дальше: следующий раздел может оказаться вполне понятным. Определите для себя, что конкретно вы не поняли в предыдущем разделе. После разъяснений преподавателя вопрос может показаться вам проще.

5. Получив копию материалов для самостоятельной работы в своё распоряжение, пользуйтесь ею как своей собственной, т.е. записывайте комментарии и делайте пометки по всему тексту (пишите также ответы на вопросы для самопроверки). Поскольку то, что вы сами добавили к материалам, обычно запоминается лучше, это хороший способ увеличить объём информации, находящейся в памяти.

6. Постоянно возвращайтесь назад и припоминайте то, что уже пройдено (для этого служит тезаурус). Чем чаще вы будете освежать в памяти пройденный материал, тем глубже вы его усвоите.

Дадим пояснения к п. 2 вышеизложенных рекомендаций. Приступая к работе с данным пособием, студенты должны (с учетом знаний теоретических основ электротехники)

#### ПОМНИТЬ:

- определение основных понятий электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей;
- способ представления линейных электрических цепей (цепи постоянного, синусоидального и несинусоидального токов), линейных цепей с двухполюсными и многополюсными элементами, трехфазных цепей;
- способ описания нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного и переменного тока;
- свойства и области применения трехфазных цепей.

#### ОБЪЯСНЯТЬ:

- основные законы электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей;
- содержание теоретических предпосылок и сущность методики использования законов Кирхгофа;
- сущность теории линейных электрических цепей (цепи постоянного, синусоидального и несинусоидального токов);
- методики аналитического расчета нелинейных цепей в различных режимах.

#### УМЕТЬ использовать:

- законы электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей;
- методы анализа линейных цепей с двухполюсными и многополюсными элементами;
- методы расчета переходных процессов в линейных цепях;
- основы теории переменного электромагнитного поля (свойства, характеристики и общие методы анализа уравнений состояния);
- аналитические и численные методы анализа нелинейных цепей при определении режимов работы;

– переходные процессы в нелинейных цепях для прогнозирования изменений электрического состояния.

## **1.2. КАК ИСПОЛЬЗОВАТЬ УЧЕБНУЮ И СПРАВОЧНУЮ ЛИТЕРАТУРУ**

Чтение учебной и справочной литературы в целях подготовки к учебным занятиям (экзаменам) может быть увлекательным и плодотворным, но может оказаться и пустым времяпровождением. Можно добросовестно сидеть над учебниками и вместе с тем видеть, что у других результат гораздо лучше. В таких случаях многие склонны впадать в бессмысленное самобичевание или оправдываться отсутствием способностей, не понимая, что истинная причина нередко кроется в неумении правильно читать.

Если вы хотите исправить положение, то прежде всего проанализируйте свой подход к процессу чтения и определите, насколько он эффективен. Для начала представьте себе, что вам задали прочитать книгу и изложить ее содержание. Каков ваш подход к выполнению этого задания? Наметьте план действий. Определите, что вы хотите почерпнуть из используемого источника, запишите вопросы, на которые необходимо получить ответы. По мере того как в процессе чтения вы будете находить ответы, последние будут «регистрироваться» вами, поскольку вопросы уже «сидят» у вас в голове. Без такого плана большая часть ценной информации может быть потеряна. Если читать все подряд, то чтение может увести вас в сторону, поэтому сначала определите, где находится относящийся к вашему вопросу материал учебника. В большинстве книг имеются оглавление и индекс – используйте их при поиске нужного материала. Если книга принадлежит вам, то делайте в ней пометки, применяйте маркер для выделения важных мест, чтобы их потом можно было легко найти. Это обеспечивает последовательность в работе с книгой, ибо всякий раз, встретившись с вопросами, которые уже проработаны, можно восста-

новить по ним соответствующий ход мыслей (только не работайте так с библиотечными книгами, прежде снимите с них ксерокопию).

При работе с учебной литературой можно придерживаться следующего примерного плана.

1. Прежде чем использовать учебную, справочную или дополнительную литературу, уточните, что вас интересует: константа, единицы измерения соответствующей величины, расчетная формула, определение понятия, сущность закона, элементы теории, устройство машины и т. д.

2. Подумайте, где с наибольшей вероятностью вы сможете получить ответ на интересующий вас вопрос: в учебнике, справочнике или в дополнительной литературе.

3. Используйте прежде всего учебник, затем справочник и уже после этого дополнительную литературу.

4. Открывая книгу, не листайте беспорядочно ее страницы, а используйте для поиска оглавление, предметный и именной указатель.

5. В зависимости от целей используют следующие виды чтения. Чтение – просмотр, когда книгу просматривают бегло, изредка задерживаясь на отдельных страницах. Цель такого просмотра – первое знакомство с книгой, получение общего представления о ее содержании посредством ознакомления с оглавлением, введением, резюме (если таковое имеется). Чтение выборочное или неполное, когда читают основательно и сосредоточенно не весь текст, а только нужные абзацы, параграфы, разделы для определенной цели. При этом следует проанализировать, задуматься над тем, для чего вы читаете тот или иной раздел, чем мотивирован ваш выбор. Хороший читатель извлекает из текста нужную ему информацию за минимальное время. Чтение полное или сплошное, когда внимательно прочитывают весь текст, делая различного рода записи на основе прочитанного.

6. Прежде чем приступить к чтению каждого раздела, ознакомьтесь с заголовками подразделов и резюме (если оно есть). Это сделает ваше чтение более осмысленным и целенаправленным.

7. Отыскав в книге нужную вам главу, параграф или страницу, не стремитесь ограничиваться ее беглым просмотром, а выпишите необходимую для вас информацию. Если это константа, то выпишите ее с указанием соответствующих единиц измерения; если это единица измерения физической величины, то уточните, в какой системе; если это формула, то выпишите ее и уточните физический смысл. Читая материал о сущности понятия, теории, об устройстве машины, выделите главное, мысленно или письменно представьте план прочитанного. По мере чтения выделяйте ключевые мысли, как можно более точно формулируя их на бумаге. Запишите также вопросы, если, конечно, они у вас возникнут. Закончив работу над разделом, проверьте, насколько хорошо вы усвоили прочитанное.

8. Развитие мысли. Запоминание конкретных фактов и логических рассуждений, изложенных в книге, безусловно, самое главное. Однако вы должны также попытаться развить и письменно изложить свою собственную точку зрения относительно прочитанного.

Каждый вопрос темы изучается по рекомендуемой в библиографическом списке литературе. По мере изучения темы по данному пособию или учебной литературе необходимо составить в рабочей тетради список условных обозначений величин.

### **1.3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ**

Степень успешности работы по овладению указанными знаниями и умениями можно выявить с помощью решения типовых задач.

В основе каждой задачи лежит частное проявление общей теории электрических машин. Поэтому прежде чем приступить к решению задач, необходимо тщательно проработать по пособию соответствующий теоретический раздел. Без твердого знания теории нельзя рассчитывать на успешное решение даже сравнительно простых задач.

Процесс решения задачи в известной мере похож на небольшое исследование, и здесь, как и в любом исследовании, трудно рекомендовать определенную последовательность действий для получения пра-

вильного результата. Задачи отличаются многообразием условий и данных, поэтому приемы их решения различны. В то же время можно привести следующие общие указания по решению большинства задач.

1. Внимательно прочитать условие задачи и при необходимости дать его наглядную схемную интерпретацию, используя условные графические обозначения элементов электрических схем и электрических машин в соответствии с ГОСТ.

2. Записать числовые данные условия задачи и единицы измерения. Указать и те величины, числовые значения которых непосредственно не задаются, но о них можно судить по условию задачи. Например, если в условии сказано, что активным сопротивлением обмотки можно пренебречь, следует записать  $R = 0$ , а если в задаче рекомендуется не учитывать явление насыщения, то значение магнитной проницаемости принимается постоянной величиной,  $\mu = const$ . Установить искомые величины и единицы их измерения.

3. В зависимости от характера задач подобрать нужную формулу. Если искомая величина определяется из нескольких выражений, то необходимо сверить заданные величины с величинами, входящими в различные формулы, и выбрать нужное выражение. При необходимости выполнить преобразования для определения искомой величины. В найденное выражение подставить числовые значения заданных величин, предварительно осуществив пересчет всех данных и выразив их в системе СИ.

4. Если решение задачи требует графических построений, то следует предварительно наметить последовательность графических операций. Исходя из выбранного формата листа, рассчитать масштабы для графических построений и определить необходимые величины в соответствующем масштабе. На осях координатной системы рекомендуется нанести равномерные шкалы. При этом последнее деление на оси должно быть на 10÷15 процентов больше максимального значения изменяющейся величины. При выполнении построений последовательность графических операций отмечать цифрами.

5. Провести числовой расчет и анализ полученного результата. Правильность полученного ответа в некоторой степени проверяется размер-

ностью. Получив числовой ответ, следует по возможности оценить его соответствие реальному физическому смыслу исходной величины.

6. При выполнении вычислений следует записывать ответ с определенной степенью точности, соответствующей точности исходных данных, а также техническому или конструктивному смыслу искомой величины. В большинстве случаев достаточно значений с тремя значащими цифрами. Для записи больших и малых значений рекомендуется использовать множитель  $10^{\pm k}$ .

7. В заключение целесообразно проанализировать расчетную формулу, последовательность графических построений или алгоритм расчета и выяснить, как изменяются искомые величины при изменении других величин, функцией которых они являются; относительные числовые значения составляющих, определяющих искомые величины, и т.п. Такой анализ расширяет представление о рассматриваемом явлении, выявляет его характерные особенности.

Для успешного обучения необходимо составлять собственный банк задач. Можно дать следующие общие указания по его созданию.

1. Используйте задачи и упражнения из соответствующих учебников, в частности отработанные там примеры (при этом старайтесь не заглядывать в решения). Отберите подходящие задания и включите их в свой банк задач (со ссылкой на источник, чтобы потом можно было найти решение).

2. Встретившись с **незнакомой задачей**, в течение нескольких минут проведите мозговой штурм следующим образом: в центре чистого листа бумаги напишите суть задачи и обведите овалом, от него в разных направлениях проведите стрелки, у их концов запишите идеи, которые могут оказаться полезными для решения задачи. Затем решите, с реализации каких идей будет разумнее всего начать.

3. Все условия решённых вами задач сохраняйте в записной книжке или на карточках, но отдельно от решений. Указывайте, где можно найти их решения. Затем регулярно практикуйтесь в решении задач, заглядывая в ответы для проверки полученного результата. **Рассматри-**

**вайте различные варианты решаемых задач.** Изменяйте условия и численные данные. Практикуйтесь в решении разных вариантов задач.

4. Пользуйтесь конспективной записью решения задачи. Не пишите полных ответов, записывайте только основные этапы расчётов, проводимых в процессе решения. Благодаря этому вы во много раз повысите свою производительность по сравнению с тем, что имели бы, записывая каждое действие.

При создании банка задач алгоритм их решения можно проверить по соответствующим разделам пособия ( типовые задачи по определенной теме), где приводятся все ответы, комментарии, предписания, решения, и убедиться в том, что задача решена верно, или найти допущенные ошибки.

#### 1.4. СОСТАВЛЕНИЕ РЕЗЮМЕ ПРОЧИТАННОГО

Умение составлять резюме – исключительно полезное качество, которое формируется практикой. С его помощью вы можете сократить объём материала, который вам необходимо выучить. Резюмируя материал, вы тем самым определяете, что в нём важно, а что нет.

Сознательно стремитесь к тому, чтобы сокращать объём информации, который нужно запомнить. Работая с учебником, старайтесь делать выписки, фиксировать наиболее важные мысли в тетради, чтобы впоследствии использовать записи вместо книги. Глядя на страницу со своими записями (или страницу книги), **выделите на ней три наиболее важных положения**, т.е. таких, знание которых потребуется с наибольшей вероятностью. Запишите эти положения как можно короче – предложениями в одну строку.

Отмечайте информацию, которую, по вашему мнению, действительно следует запомнить (по объёму она составит, возможно, лишь небольшую долю страницы). Делайте ссылки на страницы по разделам резюме, а через несколько дней взгляните на него и попытайтесь медленно восстановить часть содержания книги, а если что-то забыли – откройте соответствующие страницы.

Стремитесь постепенно всё больше работать со своими резюме, а не с оригиналами источников. На то, чтобы перечитать резюме, требуется гораздо меньше времени, чем на просмотр нескольких страниц оригинального текста. Постарайтесь, чтобы резюме охватывало все основные положения и идеи, которые необходимо усвоить.

Практикуйтесь в использовании резюме для восстановления в деталях содержания соответствующих тем. С помощью оригинального материала проверяйте, не пропущено ли что-то. Восполняйте эти пропуски несколькими словами в своём резюме так, чтобы в следующий раз они послужили вам подсказкой.

### **1.5. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ И ДИАГРАММ ПРИ ЧТЕНИИ УЧЕБНИКА**

Опорой при усвоении материала служат схемы, использование которых развивает и делает привычной самопроверку после прочтения текста.

Например, читая учебник или просматривая свои записи, можно изобразить посередине листа бумаги овал, как бы создавая тело «паучка», и вписать в него тему или вопрос. Пример схемы «паучок» по теме «Охлаждение электрических машин» приведен на рис. 1.1. Далее рисуются линии, исходящие из овала, и на их концах пишутся одно-два слова, которые могли бы напомнить о понятиях или фактах, важных для данной темы (образуются «ножки» «паучка»). Эти понятия нужно расположить в том порядке, в каком они встречались в уже известном тексте по данной теме, или же в том, какой вам кажется подходящим. Затем нужно попытаться усилить устойчивость каждой из «ножек», присоединяя к ней ключевые слова или фразы, которые служат опорой для памяти.

Другой вариант – схема типа «генеалогическое дерево», в которой выделяются основные составляющие более сложного общего понятия. Пример схемы типа «генеалогическое дерево» по теме «Надежность электрических машин» приведен на рис. 1.2.

Разделяется пополам лист бумаги. На левой половине его следует записать входящие в новый материал понятия, ключевые слова и т. п. Для проверки на правой стороне листа рисуется схема по типу «гене-

алогическое дерево», которая отражает основное содержание нового материала. Для этого, используя перечень основных положений данной темы, нужно расставить в них приоритеты. Вначале определяется самое важное из этих положений, затем самое важное из оставшихся и т.д. Наконец схема сопоставляется с составленными перечнями основных понятий.

## **1.6. СОСТАВЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО БАНКА ВОПРОСОВ**

По мере чтения составляйте вопросы. Как только вы пройдёте какое-либо важное место, составьте по тексту вопрос для последующей самопроверки (с указанием страницы, чтобы можно было посмотреть в книгу, если понадобится). Составляйте списки таких вопросов в процессе работы. Активное чтение – это чтение с пером в руке!

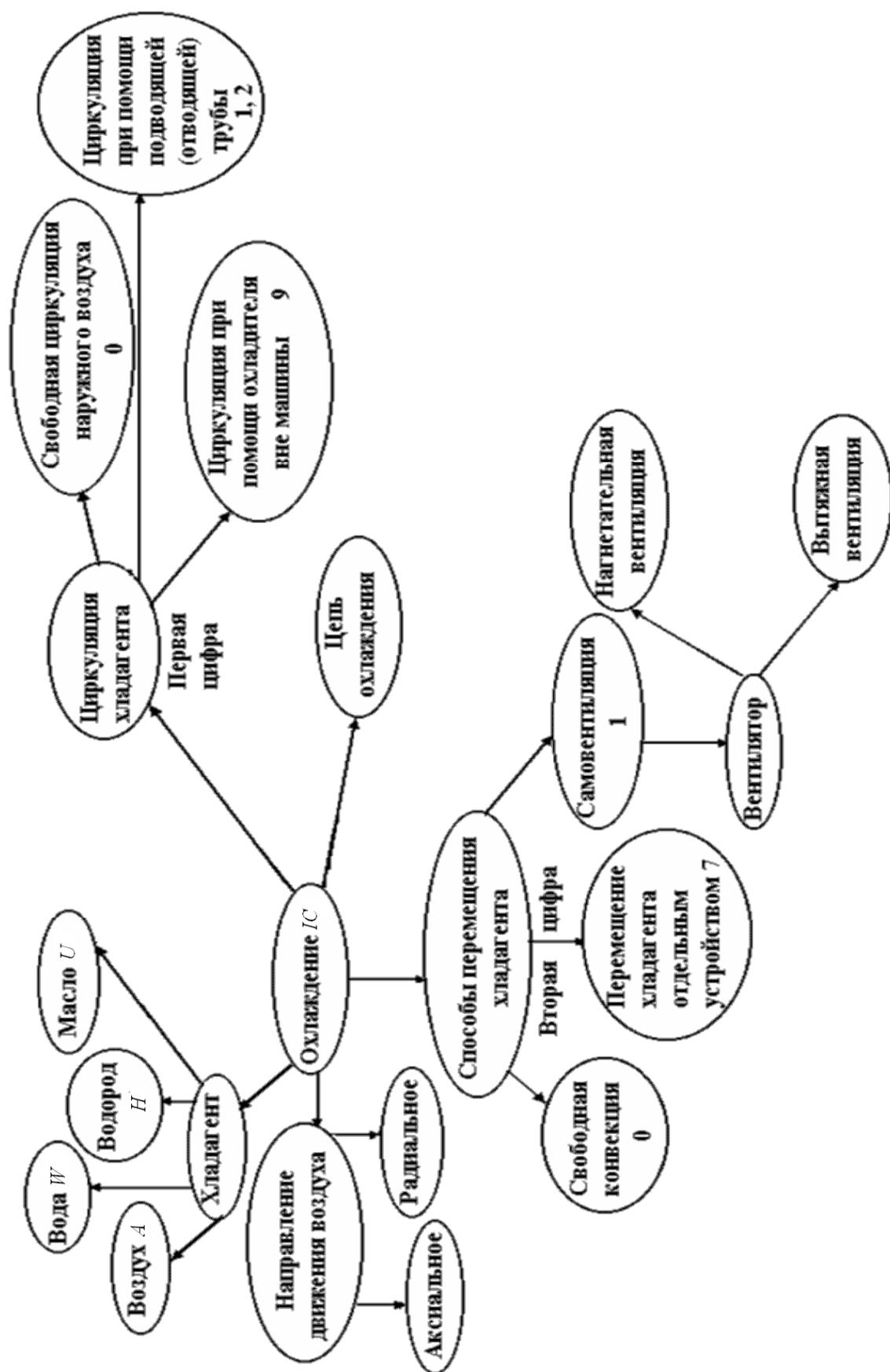


Рис. 1.1

Ключевые слова

- Показатели надежности
- Восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты
- Ремонтируемые и неремонтируемые объекты
- Безотказность
- Долговечность
- Ремонтопригодность
- Сохраняемость

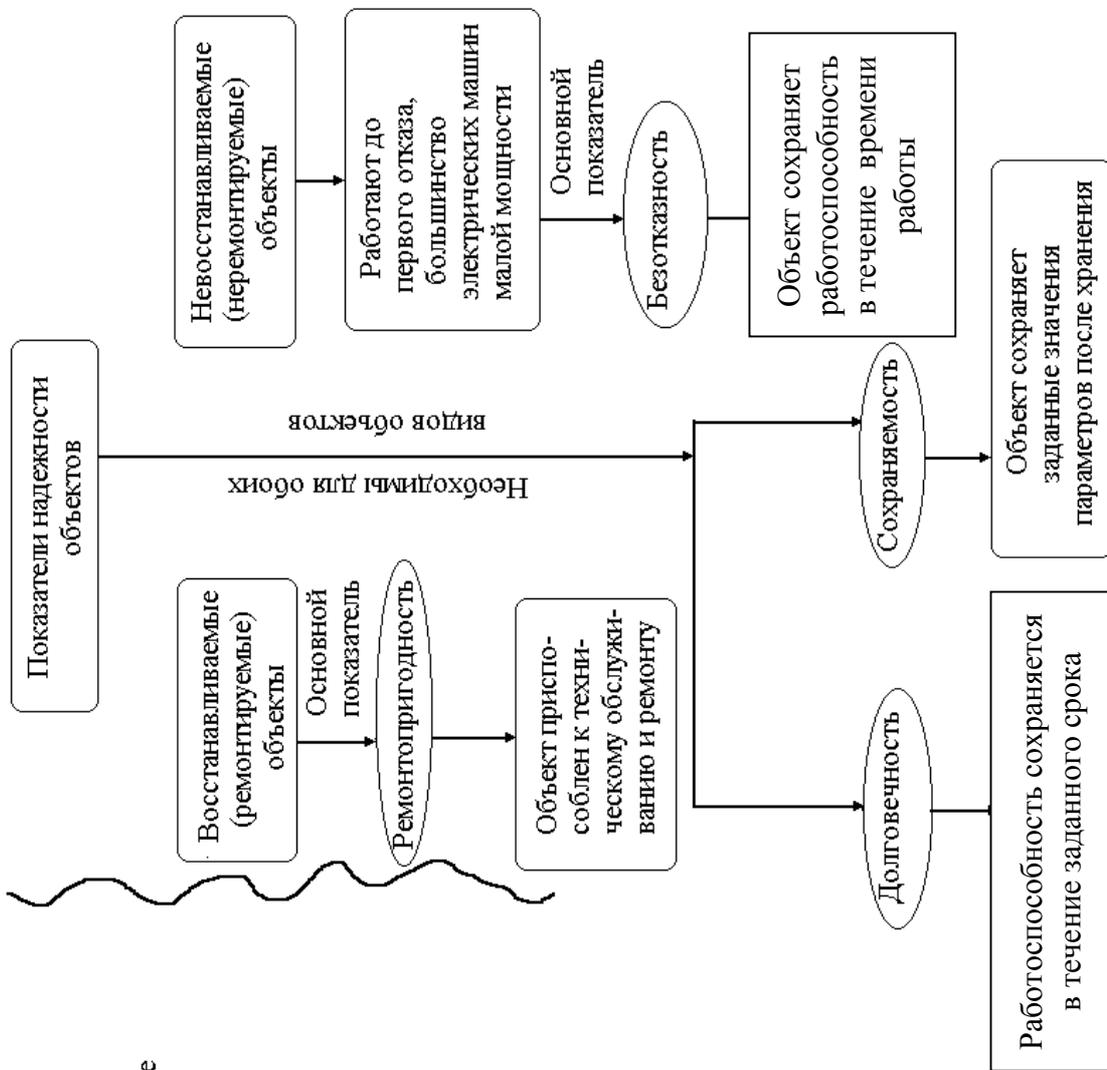


Рис. 1.2

Глядя на страницу со своими записями (или страницу книги), определите, какие вопросы можно задать по этому материалу. Сформулируйте их коротко и точно. Если заниматься составлением банка вопросов на протяжении всего времени учёбы, то можно ответить на любой разумный вопрос по теме.

Собирайте и записывайте вопросы из учебных примеров. Ответы записывайте отдельно от вопросов или заданий. При этом при чтении вопросов следует подумать над ответом (ведь если ответ на виду, вы будете невольно искать его глазами). **Регулярно работайте со своим банком вопросов.** Практиковаться с ним можно и несколько минут, и дольше. Потратьте несколько минут для того, чтобы просмотреть 20 вопросов и определить, на какие из них вы пока не знаете ответов. Найти такие вопросы очень важно, чтобы наметить пути восполнения обнаруженных пробелов.

Работу по составлению вопросов лучше всего выполнять вместе с сокурсниками. Если вы втроем посидите пять минут и выпишете по десять важных вопросов, а затем ими обменяетесь, каждый из вас будет иметь намного больше десятка готовых вопросов, которые придумал сам. Включите эти вопросы в свой банк. Можно также, объединившись с двумя-тремя сокурсниками, создать группу для решения задач. При этом задавайте друг другу задачи и оценивайте их решения, как если бы вы были экзаменатором.

### **1.7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ВОПРОСОВ И САМОКОНТРОЛЮ**

Если целью обучения является освоение какого-либо учебного материала, то в процессе работы над этим материалом необходим постоянный самоконтроль.

Самоконтроль так или иначе связан с вопросами, которые неизбежно возникают перед обучающимся при работе над тем или иным материалом. И обучающийся должен суметь дать на них ответы.

Вопросы для самоконтроля необходимо составлять ко всем блокам учебного материала, а не выборочно, иначе можно упустить ка-

кие-то блоки, а они могут оказаться важными. Нужно учиться разбивать материал на мелкие блоки, выделяя в них основные мысли.

Возьмем фрагмент из [2, с. 370, 371]:

«...Наиболее эффективным средством подавления влияния реакции якоря по поперечной оси является применение в машине компенсационной обмотки. Эту обмотку укладывают в пазы полюсных наконечников... и включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы МДС компенсационной обмотки  $F_k$  была противоположна по направлению МДС обмотки якоря  $F_a$ . Компенсационную обмотку делают распределенной по поверхности полюсного наконечника всех главных полюсов машины. При этом линейную нагрузку для компенсационной обмотки принимают равной линейной нагрузке обмотки якоря.

Включение компенсационной обмотки последовательно в цепь якоря обеспечивает автоматичность компенсации МДС якоря при любой (в пределах номинальной) нагрузке машины. Таким образом, в машине постоянного тока с компенсационной обмоткой при переходе от холостого хода к режиму нагрузки закон распределения магнитной индукции в зазоре главных полюсов остается практически неизменным».

Общие вопросы мало что дадут. Например, такой: каково назначение компенсационной обмотки? Нужна детализация. Разобьем этот материал на блоки и представим их в виде вопросов и ответов.

*Вопрос:* Какое средство для подавления влияния реакции якоря по поперечной оси наиболее эффективно?

*Ответ:* Наиболее эффективным средством подавления влияния реакции якоря по поперечной оси является применение в машине компенсационной обмотки.

*Вопрос:* Куда укладывается и как подключается компенсационная обмотка?

*Ответ:* Компенсационную обмотку укладывают в пазы полюсных наконечников и включают последовательно с обмоткой якоря.

*Вопрос:* Как должна быть направлена МДС компенсационной обмотки по отношению к МДС обмотки якоря?

*Ответ:* МДС компенсационной обмотки  $F_k$  противоположна по отношению к МДС обмотки якоря  $F_a$ .

*Вопрос:* В полюсные наконечники каких полюсов и каким образом укладывают компенсационную обмотку?

*Ответ:* Компенсационную обмотку распределяют по поверхности полюсного наконечника всех главных полюсов машины.

*Вопрос:* В каком диапазоне обеспечивается компенсация МДС якоря с помощью компенсационной обмотки?

*Ответ:* Включение компенсационной обмотки последовательно в цепь якоря обеспечивает автоматичность компенсации МДС якоря при любой (в пределах номинальной) нагрузке машины.

В ответе на каждый вопрос должно быть не более семи единиц для запоминания. В соответствии с закономерностями функционирования памяти запоминается и воспроизводится непосредственно после прочтения семь плюс-минус две единицы. Дополнительные элементы не запоминаются и мешают запоминанию других.

Для примера возьмем уже приведенный «вопрос – ответ».

*Вопрос:* В полюсные наконечники каких полюсов и каким образом укладывают компенсационную обмотку?

*Ответ:* Компенсационную обмотку **распределяют по поверхности полюсного наконечника** (первая единица) **всех главных полюсов** (вторая единица) машины.

Единицей для запоминания можно считать не только то, что перечисляется, но и то, что представляет собой некоторую обязательную сущность.

Например:

*Вопрос:* Перечислите причины, вызывающие искрение на коллекторе.

*Ответ:* Причины, вызывающие искрение на коллекторе, разделяют на механические, потенциальные и коммутационные. Три единицы для запоминания.

Если же встает, например, вопрос о заучивании каких-то десяти признаков, то надо их разбить на группы и задавать вопрос по каждой группе. Примером может служить классификация обмоток якоря (петлевые и волновые, простые и сложные, право- и левоходовые, комбинированные и т.д.).

Каждый вопрос, будучи заданным в надлежащее время и в надлежащем месте, может стимулировать правильный ответ, верную идею, адекватно направленное движение мысли, которые способны продвинуть вперед решение какой-либо задачи. Итак, вопрос может сыграть роль стимулятора (химики в таких случаях говорят о «катализаторах»), ускоряющего желаемую реакцию. Подобные вопросы представляют собой как бы индукторы идей.

Конечно, в некоторых случаях трудно определить, какой именно вопрос следовало бы задать, но тогда можно перебирать их один за другим до тех пор, пока в конце концов не обнаружится такой вопрос, который окажется полезным. Таким образом, можно использовать изученные разделы как каталог подходящих вопросов, как контрольный перечень их.

Нельзя, однако, пользоваться этим перечнем беспорядочно, выбирая вопросы наугад; нельзя им пользоваться также механически, перебирая вопросы в жестко установленном порядке. Следует обращаться с этим перечнем вопросов так, как опытный рабочий на производстве обращается с ящиком с инструментами. Он окидывает внимательным взглядом материалы для работы, которую ему предстоит выполнить, а затем выбирает инструмент. Возможно, ему придется испробовать несколько инструментов, прежде чем он подберет нужный, но и в этом случае рабочий не станет вынимать инструменты из ящика наугад или в строго установленном порядке: он выбирает их с рассудком.

Если возникает необходимость в прочном усвоении какого-либо материала, который, например, может понадобиться в дальнейшей трудовой деятельности, то нужно записывать эталонные ответы на вопросы. С ними затем можно будет сверять любые пробные ответы.

Эталонные ответы должны быть скрыты при предъявлении вопросов (самоконтроле), иначе трудно понять, усвоена информация

или вспомнить ее помогли какие-то элементы из эталонного ответа на другой вопрос.

В то же время необходимо обеспечить возможность мгновенного сличения пробных ответов с эталонными, так как трата времени на поиск нужного эталонного ответа раздражает и приводит к бегству от рутинной непроизводительной работы.

Оба этих требования можно выполнить, если завести тренажер самоконтроля по дисциплине, разделу или отдельной теме (кому как удобно). Он может представлять собой блокнот или разрезанную надвое обычную учебную тетрадь. На обратной стороне страницы помещаются несколько небольших доз информации, подлежащей запоминанию (не более семи единиц для запоминания). Это могут быть определение, классификация, перечисление, разъяснение термина, вывод формулы, числовые характеристики. На лицевой стороне страницы записываются вопросы, соответствующие этим единицам запоминания. Вопросы могут быть раскрывающими одну тему либо, напротив, разные темы.

При работе с тренажером любой вопрос можно задавать себе несколько раз, вновь и вновь раскрывая нужную страницу. Если же наконец выясняется, что при сверке с эталонным ответом пробный ответ неоднократно оказывался правильным и время, в течение которого давался пробный ответ, было довольно коротким, что в представлении студента устраивает преподавателя, то страница каким-то образом помечается как выученная.

Тренажер самоконтроля следует рассматривать не как самостоятельное устройство для обучения, а как дополнение к объясняющему тексту, позволяющее дробить изучаемый материал.

Студент может начать составлять тренажер самоконтроля применительно к особо значимым для будущей профессиональной деятельности или особо трудным для запоминания частям текстов по разным темам, а затем расширять постепенно его использование. Имеет смысл дополнять тренажер новым актуальным материалом по мере его накопления.

Может показаться, что работа над созданием тренажера непроизводительна, требует больших затрат времени, чем при других способах самоконтроля, и что эти затраты неоправданны.

Однако проблемы легко решить, если работа ведется коллективно: один студент готовит тренажер по одной теме, другой – по другой. В этом случае к экзамену накопится некоторый массив тренажеров.

Возможно, что при составлении тренажеров времени уйдет значительно больше и при самоконтроле по нему тоже несколько больше, чем при «традиционных» способах обучения. Но эти «потери» времени компенсируются тем, что в любой момент, когда надо освежить знания, тренажер сократит непроизводительную работу. Так, например, если был подготовлен тренажер к экзамену по одной дисциплине, знания по которой используются при изучении другой, то подготовленным тренажером можно воспользоваться перед экзаменом по новой дисциплине. При этом на доучивание уйдет времени значительно меньше.

Кроме того, работа по составлению тренажера творческая. Нужно перевести текст в вопросно-ответную форму. Причем в процессе такой работы происходит непроизвольное запоминание некоторых единиц информации. Составление тренажера способствует углубленной работе над материалом, дисциплинирует мысль, заставляет приводить материал в более строгий логический порядок (раскладывать его «по полочкам»).

При решении какой-либо задачи важно иметь внушительный и упорядоченный запас знаний. В хорошо упорядоченном запасе знаний объекты, которые требуются особенно часто, располагаются в самых доступных местах, причем так, чтобы было удобнее группировать (попарно или объединяя в большие совокупности) связанные друг с другом объекты.

В любом конкретном вопросе всегда имеются ключевые факты. Они всегда должны находиться поблизости, когда вы приступаете к решению задачи. Лучшей организации знаний может способствовать обзор близких друг другу задач, связанных общностью неизвестных или общностью данных.

Последовательность работы над вопросами может быть линейная или разветвленная.

Линейная последовательность работы над вопросами – это жестко установленная последовательность «кадров», одинаковая для всех обучаемых.

Разветвленная последовательность работы над вопросами – это такая последовательность, при которой обучаемые разной степени подготов-

ленности продвигаются в процессе работы над пособием различными путями. При правильном ответе отдельные вопросы могут быть опущены, при неточном предусматриваются дополнительные вопросы.

Найти ответы на вопросы можно как в рекомендуемой литературе из библиографического списка, так и в тезауусе темы. При этом возможна ситуация, когда на несколько вопросов можно найти ответ в одной дескрипторной статье и, напротив, на один вопрос нужно искать ответ в нескольких дескрипторных статьях тезаууса.

Так, например, на вопросы 8 и 9 главы 6 можно найти ответы в дескрипторной статье тезаууса **полюсные обмотки**. Определим последовательность работы с тезауусом при ответах на эти вопросы. Для этого рассмотрим схему работы с пособием при ответе на вопросы на примере фрагмента дескрипторной статьи (рис. 1.3).

В то же время при ответе на вопрос 16 главы 6 необходимо использовать две статьи тезаууса: **искрение под щеткой** и **коммутация тока в коллекторной машине**.

«...В двигателях постоянного тока, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, характеризующихся частыми пусками в ход, реверсами, возможными 1,5...2 - кратными перегрузками по току применяют еще одну обмотку, которую называют компенсационной обмоткой. Проводники этой обмотки размещают в пазах выполненных в полюсных наконечниках. Включают эту обмотку последовательно в цепь якоря так, чтобы создаваемая ею магнитодвижущая сила и магнитное поле были бы направлены встречно МДС поперечной реакции якоря.../Компенсационные обмотки используются в машинах постоянного тока относительно большой мощности и часто изготавливаются по типу стержневых обмоток, которые могут укладываться в пазы, выполненные на поверхности башмаков главных полюсов. Компенсационные обмотки позволяют улучшить процесс коммутации в щеточно-коллекторном узле. Благодаря этому снижаются искрение и дугообразование на коллекторе».



Рис. 1.3

## Глава 2. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Перед началом изучения теоретического материала темы необходимо знать понятия ранее изученных дисциплин (теоретические основы электротехники, электротехнические материалы и др.).

**Абсолютная магнитная проницаемость** – величина, характеризующая магнитные свойства вещества, скалярная для изотропного вещества и тензорная для анизотропного вещества, равная отношению модуля магнитной индукции к модулю напряженности магнитного поля.

**Амплитудное значение** – максимальное мгновенное значение величины, изменяющейся по синусоидальному закону в функции времени.

**Ампер (А)** – единица измерения силы электрического тока; определяется через силовое взаимодействие проводников с током. Эта единица получила название в честь известного французского физика Андре Мари Ампера (1775—1836) и является одной из семи основных единиц Международной системы единиц СИ. Ампер есть сила постоянного тока, который, будучи поддерживаемым в двух параллельных прямолинейных проводниках бесконечной длины и ничтожно малого сечения, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызвал бы между этими проводами силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н/м.

**Ватт (Вт)** – единица измерения электрической мощности. Мощность электрического потребителя составляет 1 Вт, если в течение 1 с в нем совершается работа в 1 Дж:  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ с}$ . Единица измерения названа в честь английского инженера Джеймса Ватта (1736 – 1819).

**Вебер (Вб)** – единица измерения магнитного потока. Данная единица измерения определяется с помощью электромагнитной индукции. Если пронизывающий контур магнитный поток изменяется со скоростью 1 Вб/с, то в указанном контуре наводится напряжение в 1 В:  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}$ . Согласно Международной системе единиц измерения СИ вебер – магнитный поток, создаваемый однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через площадку в  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению поля. Единица измерения названа в честь немецкого физика Вильгельма Вебера (1804 – 1891).

**Вольт (В)** – единица измерения электрического напряжения. Данная единица определяется работой, затрачиваемой на перемещение электрического заряда в электрическом поле. Напряжение между двумя точками электрического поля равно одному Вольту, если при перемещении заряда в один Кулон из одной точки в другую совершается работа в один Джоуль. Напряжение между двумя точками проводника составляет 1 В, если при протекании через проводник неизменного по величине тока силой 1 А на указанном участке проводника выделяется

мощность в 1 Вт:  $1 \text{ В} = 1 \text{ Вт}/1 \text{ А}$ . Эта единица измерения названа в честь итальянского физика Алессандро Вольты (1745 – 1827).

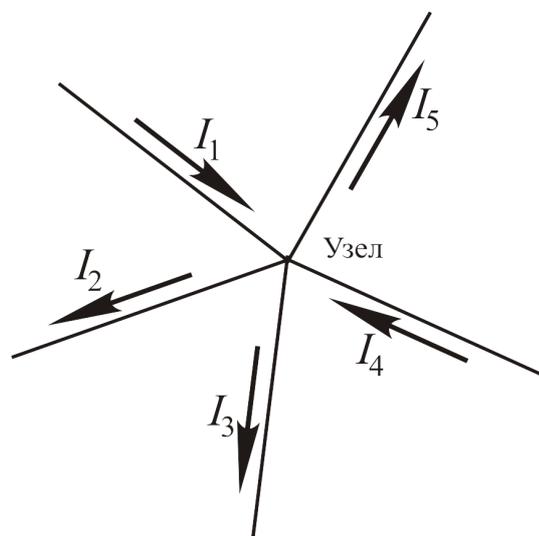
**Генри (Гн)** – индуктивность такого контура, с которым сцеплен магнитный поток 1 Вб, когда по контуру протекает ток силой 1 А. Единица названа в честь американского физика Джозефа Генри (1797—1878) и характеризует также магнитную проводимость участка магнитной системы, обратно пропорциональную его магнитному сопротивлению:  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб}/1 \text{ А}$ .

**Герц (Гц)** – единица измерения частоты. 1 Гц – это частота периодического процесса, при котором совершается один цикл за 1 с:  $1 \text{ Гц} = 1/1 \text{ с}$ . Единица названа в честь немецкого физика Генриха Герца (1857 – 1894).

**Действующее (эффективное) значение** – среднеквадратичное значение периодической величины, например переменного тока, действие которого при протекании его через некоторое сопротивление идентично действию постоянного тока определенного значения. При синусоидальном изменении физической величины действующее значение в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудного значения. На практике большинство электроизмерительных приборов измеряют действующее значение тока и напряжения цепи.

**Джоуль (Дж)** – единица измерения электрической работы, т. е. работа, которую совершает постоянная сила, равная 1 Н, на пути в 1 м, пройденном телом под действием этой силы по направлению, совпадающему с направлением силы:  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}$ . Единица названа в честь английского физика Джеймса Джоуля (1818—1889).

**Закон Кирхгофа первый** – один из основных законов электрических цепей, согласно которому алгебраическая сумма токов всех ветвей, сходящихся в одном узле, равна нулю или сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из этого узла (рис. 2.1).



Для цепи, изображенной на рис. 2.1, этот закон записывается в следующем виде:  $I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$ .

**Закон Кирхгофа второй** – алгебраическая сумма падений **напряжения** в любом замкнутом контуре электрической цепи равняется алгебраической сумме ЭДС того же контура. При составлении уравнения по второму закону Кирхгофа для замкнутого контура (рис. 2.2) направление его обхода выбирается условно (по или против часовой стрелки).

На рис. 2.2 использованы следующие обозначения:  $I$  – ток;  $U$  – напряжение;  $R$  – сопротивление;  $E$  – ЭДС источника.

Стрелками на рисунках показаны направления токов ветвей и направление уменьшения напряжений на зажимах резисторов. При обходе по часовой стрелке уравнение может быть записано в следующем виде:  $(-E_1) + (-U_1) + (+U_4) + (+U_2) + (+E_2) + (-U_3) = 0$ , а при обходе против часовой стрелки  $(E_1) + (U_3) + (-E_2) + (-U_2) + (-U_4) + (+U_1) = 0$ .

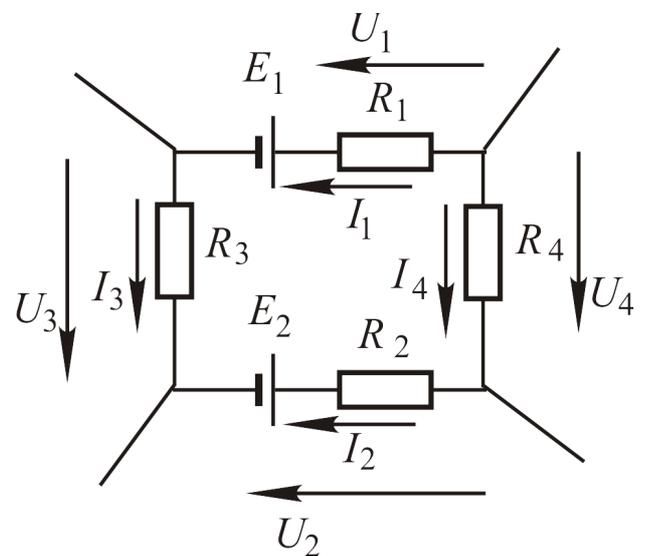


Рис. 2.2

Падение напряжения имеет положительный знак, если его направление совпадает с направлением обхода контура, и отрицательный в противном случае. При изменении значения ЭДС хотя бы одного источника указанное равновесие напряжений в контуре нарушится и наступит новое электрическое равновесие в контуре за счет изменения токов и напряжений элементов всей электрической цепи.

**Закон Ленца** – при всяком изменении магнитного потока, сцепляющегося с каким-либо проводящим контуром, в последнем возникают электродвижущие силы, стремящиеся препятствовать изменению **магнитного потока**.

При изменении магнитного потока, сцепленного с замкнутым проводящим контуром, в последнем наводится противо-ЭДС, вызывающая протекание тока в этом контуре. Этот ток направлен таким образом, что при увеличении магнитного потока создаваемый им собственный поток направлен навстречу внешнему магнитному потоку, а при уменьшении внешнего магнитного потока – наоборот, т.е. в обоих случаях ток в контуре стремится поддержать значение потока неизменным. Закон назван в честь русского академика Э.Х. Ленца (1804 – 1865).

**Индукция магнитного поля** – характеристика магнитного поля в рассматриваемой точке. Величина индукции равна отношению силы, действующей в магнитном поле на единицу длины проводника с током, перпендикулярного направлению поля, к силе тока в проводнике.

**Магнитная проницаемость (абсолютная магнитная проницаемость)** – величина, характеризующая магнитные свойства вещества. Условное обозначение –  $\mu_a$ . Она определяется из выражения  $\mu_a = B/H$ , где  $B$  – индукция;  $H$  – напряженность магнитного поля.

На практике наиболее часто используется величина, называемая относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ , равная отношению **абсолютной магнитной проницаемости** к магнитной постоянной. Магнитная постоянная  $\mu_0$  является магнитной проницаемостью вакуума и равна  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м. Абсолютная магнитная проницаемость материала определяется произведением абсолютной магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$  на относительную магнитную проницаемость материала, т.е.  $\mu_a = \mu_0 \mu$ .

При этом  $\mu$  показывает, во сколько раз хуже или лучше магнитные свойства конкретного материала или вещества по сравнению с вакуумом. У диамагнетиков ( $Cu, Ag, Sb, Bi, Pb$ )  $\mu < 1$ , у парамагнетиков ( $Al, Si, Co, Pt, Mn$ )  $\mu > 1$ . В магнитном отношении указанные вещества близки к вакууму или к воздуху. В ферромагнетиках  $\mu \gg 1$  (до нескольких тысяч).

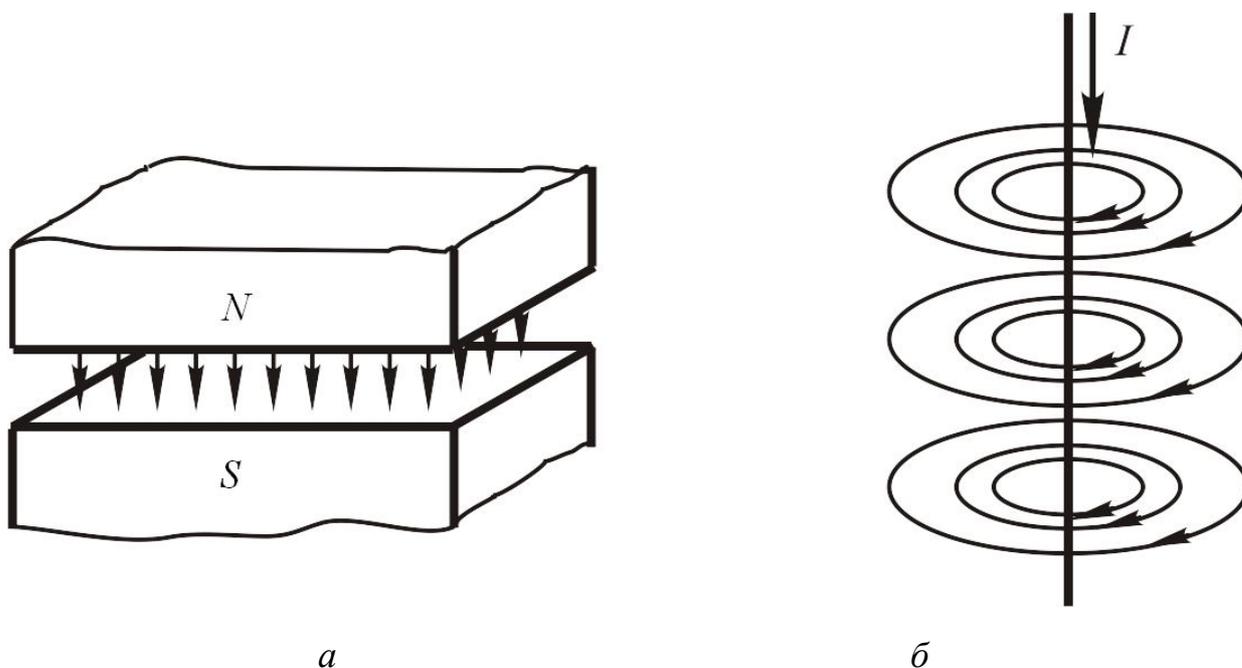


Рис. 2.3

**Магнитное поле** – одна из двух сторон **электромагнитного поля**, которая характеризует силу воздействия на движущуюся электрически заряженную частицу, пропорциональную заряду частицы и ее скорости. Физически магнитное поле обусловлено движением электрических зарядов, например движением молекул в теле постоянного магнита или протеканием электрического тока в проводнике. Графически поле может быть представлено посредством силовых линий. В зависимости от характера распределения силовых линий различают: однородное плоскопараллельное поле, силовые линии которого имеют одинаковую плотность и расположены параллельно друг другу (линии на рис. 2.3, *а*); неоднородное поле, расположение силовых линий которого не соответствует картине распределения силовых линий однородного магнитного поля (линии на рис. 2.3, *б*).

**Мгновенное значение** – одно значение какой-либо изменяющейся функции того или иного аргумента, соответствующее одному конкретному значению этого аргумента. Для обозначения мгновенных значений тока и напряжения как функций времени используются строчные буквы латинского алфавита: *i* – для тока; *u* – для напряжения.

**Направление тока** – направление движения заряженных частиц – носителей электрических зарядов. Под положительным направлением электрического тока понимают направление движения положительно заряженных частиц. Для упорядочения расчетов в случае, когда направление движения положительно заряженных частиц неизвестно, или в цепях переменного тока предполагаемое положительное направление тока может быть выбрано произвольно с последующей коррекцией направления по результатам расчета.

**Напряжение (разность потенциалов)** – скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности электрического поля по пути перемещения из одной точки поля в другую точку. В электрических цепях под напряжением или разностью потенциалов двух точек понимают работу, совершаемую при перемещении единичного положительного заряда по проводнику из одной точки цепи в другую точку. Условное обозначение –  $U$ , единица измерения – вольт (В):  $U = \Delta W/Q$ , где  $W$  – энергия;  $Q$  – заряд.

**Ом** – единица измерения сопротивления участка электрической цепи; 1 Ом – сопротивление проводника, в котором при напряжении на зажимах проводника в 1 В возникает сила тока в 1 А. Данная единица измерения названа в честь немецкого физика Георга Симона Ома (1787—1854).

**Парамагнитное вещество (см. магнитная проницаемость).**

**Потенциал (Разность потенциалов)** – характеристика электромагнитного поля в выбранной точке. Потенциал электрического поля в выбранной точке равен работе, совершаемой при перемещении единичного положительного электрического заряда из точки, напряженность электрического поля в которой равна нулю, в заданную точку. Разность потенциалов двух точек численно равна работе, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда из одной точки электрического поля в другую точку. При изменении направления перемещения заряда знак разности потенциалов изменяется на противоположный.

**Тесла (Тл)** – единица измерения индукции магнитного поля. Индукция однородного магнитного поля в рассматриваемой точке равна 1 Тл, если через поверхность, перпендикулярную силовым линиям, площадью в  $1 \text{ м}^2$  проходит магнитный поток в 1 Вб.

Согласно определению, принятому в Международной системе единиц измерений СИ, тесла – индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Ньютон на каждый метр длины прямолинейного проводника, расположенного перпендикулярно направлению силовых линий поля, если по этому проводнику течет ток силой 1 А. Единица измерения названа в честь чешского физика и электротехника Николы Тесла (1856—1943).

**Фарада (Ф)** – емкость тела из проводящего материала, электрический потенциал которого относительно другого тела с потенциалом, равным нулю, повышается на 1 В, если на этот проводник поместить заряд в 1 Кл:  $\Phi = 1 \cdot (\text{Кл}/\text{В}) = 1 \cdot (\text{А} \cdot \text{с}/\text{В})$ . Фарада используется для обозначения емкости электрических конденсаторов.

Техническая реализация конденсатора емкостью 1 Ф является сложной задачей. Так, например, у плоского воздушного конденсатора емкостью 1 Ф площадь пластин, расстояние между которыми равно 1 мм, должна составлять  $112,8 \text{ км}^2$ . Поэтому на практике для обозначения емкости конденсаторов используются более мелкие единицы измерения – пико– и микрофарады ( $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ,  $1 \text{ мФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ).

**Частота** – физическая величина, определяющая количество полных изменений (периодов) в единицу времени периодически изменяющейся величины. Условное обозначение –  $f$ ; единица измерения – **Герц (Гц)**. Частота обратно пропорциональна отрезку времени, соответствующему одному полному изменению переменной величины (периоду  $T$ ), т.е.  $f = 1/T$ .

## **Глава 3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **3.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕМЫ**

1. Основные законы, определяющие принцип действия электрических машин [1, с. 27-29; 2, с. 7-10; 4, с. 4-7].

2. Принцип действия, обратимость машин постоянного тока (МПТ) [1, с. 28-33; 2, с. 334-337; 3, с. 32-35; 4, с. 455-458; 6, с. 9-11; 7, ч. 2, с. 197, 198, 270, 271].

3. Материалы, применяемые в электрических машинах [1, с. 11-21; 3, с. 23-29; 7, ч. 1, с. 28-34].

4. Потери энергии в электрических машинах. КПД [1, с. 143-150; 2, с. 418-422; 3, с. 184-195; 4, с. 203-211; 5, с. 248-260; 6, с. 123-127].

5. Номинальный нагрузочный режим работы и номинальные данные электрических машин [1, с. 159-161; 3, с. 41, 42; 6, с. 7, 8; 7, ч. 1, с. 12-15].

6. Классификация коллекторных машин постоянного тока по способу создания магнитного потока (возбуждения) и их условное обозначение на схемах [1, с. 172-174; 2, с. 372, 373; 3, с. 197, 229].

### **3.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ**

В результате изучения темы студенты должны

**ПОМНИТЬ:**

– закон электромагнитных сил; определение якоря и индуктора МПТ; виды материалов, применяемых в электромеханических преобразователях (ЭМП); назначение основных узлов МПТ; понятие номинального нагрузочного режима МПТ; способ представления обмоток МПТ на схемах;

**ОБЪЯСНЯТЬ:**

– сущность закона электромагнитной индукции; принцип действия генератора и двигателя постоянного тока; свойство электрической обратимости ЭМП; по каким требованиям классифицируются материалы, применяемые в ЭМП; конструктивные особенности МПТ с различными способами возбуждения;

## УМЕТЬ:

– определять значение и направление силы, действующей на проводник с током; определять значение и направление ЭДС, индуцируемой в проводнике; приводить верную последовательность включения обмоток генератора и двигателя постоянного тока (ГПТ и ДПТ); определять КПД ГПТ и ДПТ; находить основные узлы МПТ на чертежах и в реальной машине; изображать на схемах МПТ, отличающиеся по способу возбуждения.

Вы также должны научиться отвечать, например, на следующие вопросы.

1. Как связан КПД с мощностью электрической машины?
2. Для чего нужен коллектор?
3. Какую роль в машине постоянного тока играют главные и добавочные полюсы?
4. В чем преимущество шихтованного сердечника якоря?
5. Из какого материала изготавливается станина в машинах постоянного тока?

### 3.3. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

В результате изучения главы 3 нужно научиться решать следующие типовые задачи.

**Задача 3.1** [1, с. 27-29; 2, с. 7-10; 4, с. 4-7].

1. Определить полярность электромагнитов на рис. 3.1, *а* и обозначить их буквами. Определить направление ЭДС в проводнике, перемещающемся в магнитном поле со скоростью  $v$ . Изобразить магнитные силовые линии между полюсами электромагнитов, изображенных на рисунке 3.1, *б* и указать стрелками их направление, если известно направление перемещения проводника и направление ЭДС, наведенной в перемещающемся проводнике. Определить полярность напряжения на зажимах обмотки электромагнита.

*Решение.* Определим направление магнитных силовых линий между полюсами и полярность электромагнитов (см. **правило правой руки**).

На рисунке 3.1, *а* верхний полюс – северный, нижний полюс – южный. Направление ЭДС в проводнике – «к нам». На рисунке 3.1, *б* верхний полюс – северный. Нижний полюс – южный. Верхний зажим обмотки электромагнита – положительный, нижний – отрицательный.

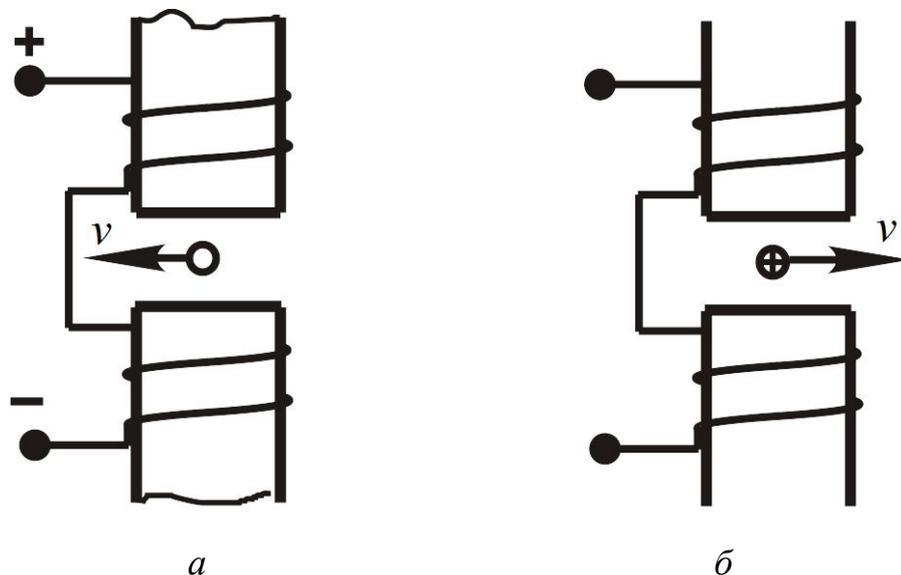


Рис. 3.1

2. Сформулировать закон электромагнитной индукции на примере магнита, представленного на рис. 3.2. Определить и указать направление ЭДС, индуцируемой в проводнике, перемещающемся в равномерном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям со скоростью  $v$  (рис. 3.2).

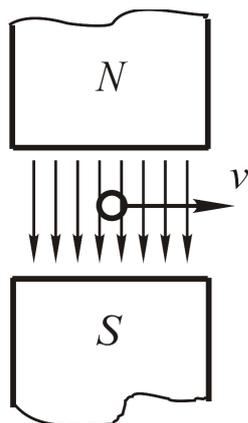


Рис. 3.2

со скоростью  $v$  (рис. 3.2).

*Решение.* Закон электромагнитной индукции. Суть его заключается в следующем: если проводник перемещается в магнитном поле перпендикулярно силовым линиям со скоростью  $v$ , то в проводнике индуцируется ЭДС, определяемая по формуле  $e = B \cdot l \cdot v$ , В, где  $v$  – линейная скорость проводника в м/с. Определим направление ЭДС, индуцируемой в проводнике (см. **правило правой руки**). Направление ЭДС проводника – «от нас».

**Задача 3.2** [1, с. 27-29; 2, с. 7-10; 4, с. 4-7].

1. Определить полярность полюсов на рис. 3.3, а и 3.3, б и обозначить их буквами.

*Решение.* Полярность приложенного напряжения и применение правила правоугового винта указывают на то, что на рис. 3.3, а верхний полюс – северный, а нижний полюс – южный. Используя правило левой руки, определяем направление тока в проводнике. Ток в проводнике течет «от нас».

2. Изобразить магнитные линии и обозначить стрелками их направление для электромагнита, изображенного на рис. 3.3, б. Определить полярность приложенного напряжения.

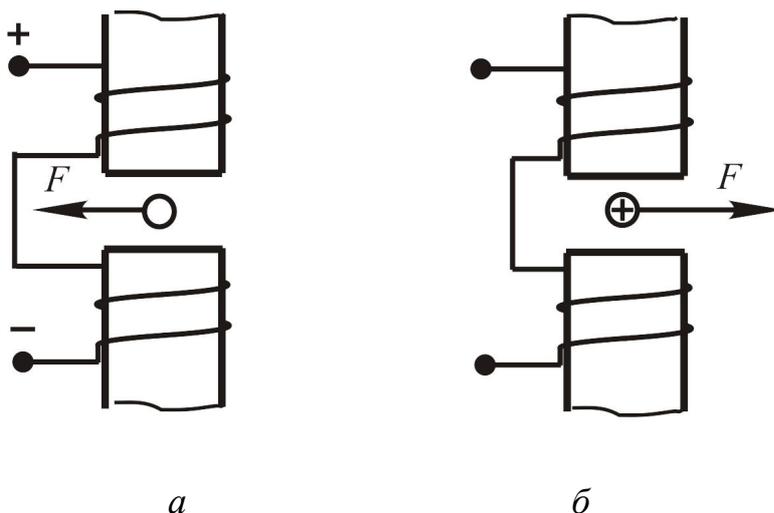


Рис. 3.3

*Решение.* Определим направление магнитных силовых линий

между полюсами и полярность электромагнитов (см. **правило левой руки**). Верхний полюс – южный, нижний полюс – северный. Правило правой руки указывает на то, что нижний зажим обмотки электромагнита подключен к положительному зажиму источника, а верхний зажим подключен к отрицательному зажиму.

3. Проводник перемещается в равномерном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям (рис. 3.4) со скоростью  $v$ . Определить силы, действующие на проводник, перемещающийся в магнитном поле.

*Решение.* В соответствии с законом электромагнитной индукции в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, наводится электродвижущая сила, направление которой определяется по правилу правой руки. Если внешняя

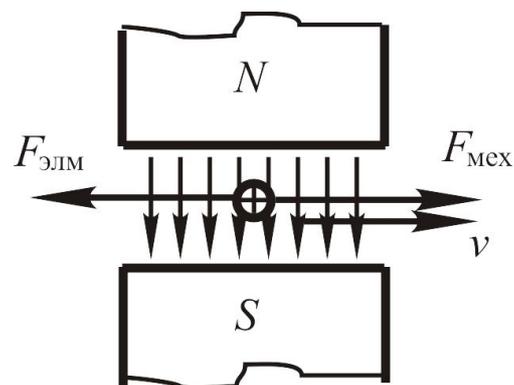


Рис. 3.4

цепь проводника замкнута, по проводнику будет протекать ток, совпадающий по направлению с ЭДС.

Для того чтобы проводник перемещался в магнитном поле со скоростью  $v$ , к нему должна быть приложена внешняя механическая сила  $F_{\text{мех}}$ . Одновременно, согласно закону электромагнитных сил, на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила  $F_{\text{элм}}$ , направление которой противоположно направлению внешней механической силы. Таким образом, если в магнитном поле с индукцией  $B$  перемещается проводник с электрическим током  $i$ , длина которого  $l$ , то между проводником с током и магнитным полем возникает силовое взаимодействие. Значение электромагнитной силы, действующей на проводник, определяется по формуле  $F_{\text{элм}} = B \cdot l \cdot i, \text{Н}$ . Определим направление электромагнитной силы (см. **правило левой руки**). Направление внешней механической силы, действующей на проводник, противоположно направлению электромагнитной силы.

**Задача 3.3.** Конструкция машины постоянного тока [1, с. 33-38; 2, с. 337-341; 3, с. 35-41; 4, с. 458-466; 5, с. 30-32; 6, с. 8, 9; 7, ч. 2, с. 199-203].

Нарисовать эскиз машины постоянного тока (рис. 3.5). Охарактеризовать основные элементы конструкции:

1 – станина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – сердечник главного полюса; 4 – сердечник якоря; 5 – обмотка якоря; 6 – вентилятор; 7 – подшипниковый щит; 8 – подшипник; 9 – коробка выводов; 10 – люк; 11 – люк – окно; 12 – коллектор; 13 – щеткодержатель со щеткой; 14 – щеточный палец; 15 – щеточная траверса; 16 – вал; 17 – лапы.

При построении эскиза необходимо начинать с вычерчивания активной части МПТ (элементы 4, 5, 2, 3, 1, 12), а затем достраивать конструктивные элементы.

Станина 1 представляет собой полый цилиндр из стали. Он снабжен с торца кольцевыми выточками для входа кольцевых выступов подшипниковых щитов 7. Место соединения щита со станиной называется замком. Станина снабжена люками, служащими для входа и

выхода охлаждающего воздуха, а также для доступа к коллекторно-щеточному узлу.

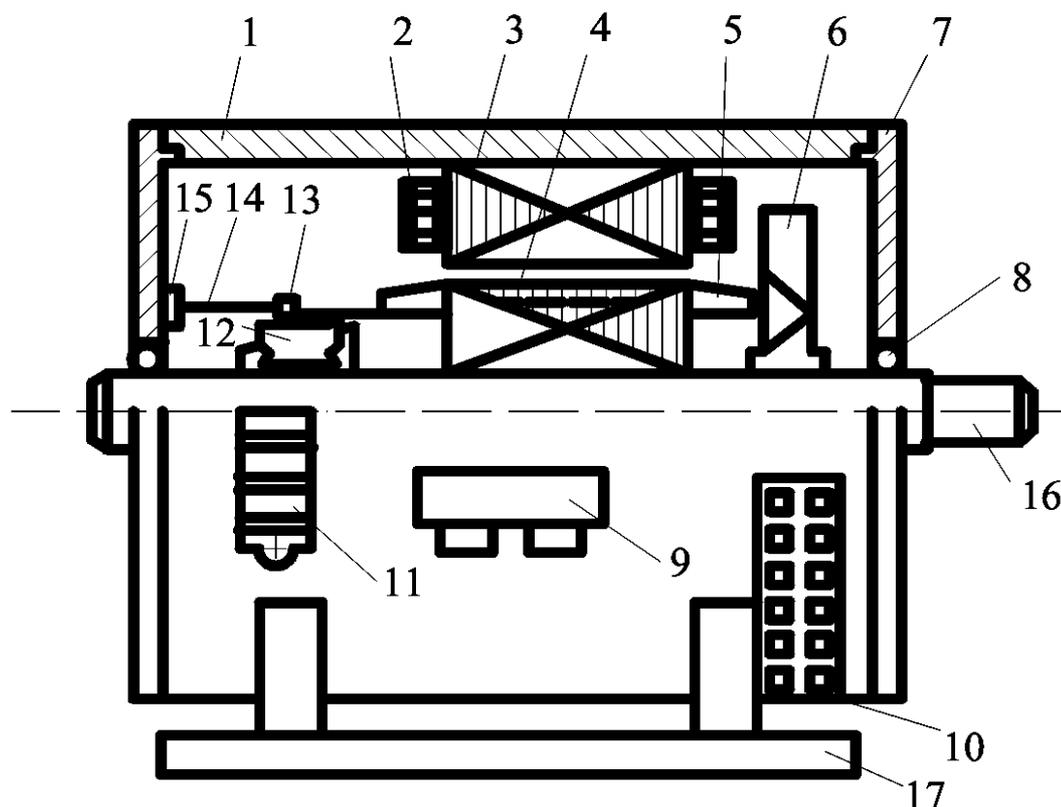


Рис. 3.5

Люк (окно) со стороны коллектора закрывается крышкой 11, снабженной жалюзи для прохода охлаждающего воздуха и козырьками для защиты от капель и водяных брызг, падающих под углом. Люк со стороны вентилятора 10 (в основном в нижней части) закрыт защитной лентой с отверстиями.

Обмотка возбуждения 2 размещается на сердечнике главного полюса 3 и выполняется медным проводом. Станина снабжается лапами 17 для крепления к фундаменту и транспортным кольцом (рымболтом) либо двумя транспортными ушками по диагонали. На валу 16 крепится сердечник якоря 4. Он выполняется из пластин электротехнической стали, шихтованных перпендикулярно оси вала, которые по внешней периферии снабжены пазами. В пазах размещается обмотка якоря 5. Обмотка выполняется из медного провода, зачастую круглого сечения (всыпная обмотка), но провод может быть и прямоугольного сечения (жесткие секции). Сама обмотка состоит из отдельных элементов,

называемых секциями. Секции соединяются между собой последовательно, образуя замкнутую систему проводов, – такую обмотку называют обмоткой замкнутого типа. Конец предыдущей и начало следующей секции припаиваются к коллекторной пластине коллектора 12.

Коллектор также выполняется наборным из медных пластин, тщательнейшим образом изолированных друг от друга и вала машины. Они бывают сборочными (сборочного типа) и на пластмассе. По виду сборки коллекторы разделяются на цилиндрические и торцевые. К рабочей поверхности коллектора при помощи пружин прижимаются щетки, помещенные в щеткодержателях 13. Щеткодержатель крепится к пальцу 14, причем может выполняться из изоляционного материала или из металла, но тогда он изолируется от щеткодержателя. Палец крепится к щеточной траверзе 15, которая в свою очередь крепится к подшипниковому щиту и снабжена прорезями для перемещения траверзы по окружности, чтобы выставить щетки в нужное положение. К станине крепится коробка выводов 9.

### 3.4. ТЕЗАУРУС ПОНЯТИЙ ТЕМЫ

Если понятие в тезаурусе раскрывается с недостаточной полнотой, то даются ссылки на рекомендуемую литературу.

**Бирка с паспортными данными** – табличка из металла или пластмассы, закрепляемая на корпусе электрической машины, на которой указаны основные номинальные данные. К номинальным данным относятся номинальное напряжение и ток, номинальная мощность, частота вращения (для электродвигателей), масса и т. д. Кроме того, в табличке указывается завод-изготовитель, заводской номер, дата выпуска, тип электрической машины [6, с. 7, 8; 7, ч. 2, с. 12].

**Вентилятор** – конструктивный элемент вращающейся электрической машины, устанавливаемый на ее валу внутри или снаружи корпуса и предназначенный для охлаждения активных частей машины. Различают вентиляторы аксиального и радиального типов. В первом случае воздушный поток входит в центральную часть ма-

шины и отбрасывается затем к ее периферии. Во втором случае воздушный поток проходит вдоль оси электрической машины. В конструктивном отношении вентиляторы многообразны. Количество и скорость перемещения воздуха относительно охлаждаемых поверхностей зависят от частоты вращения вентилятора. Лопасты изготавливаются из стали, алюминиевых сплавов, чугуна или пластмассы [2, с. 341; 3, с. 39].

**Вихревой ток** – ток, возникающий в массивных деталях из металла под действием **электромагнитной индукции**. При прохождении переменного **магнитного поля** через массивные металлические детали в теле детали возникает движение электронов, т.е. вихревой ток. Ввиду того, что вихревой ток по своему характеру близок к току короткого замыкания, он вызывает сильный нагрев магнитопроводов. Появление вихревого тока приводит, как правило, к нежелательным явлениям: перегреву, изменению механических и магнитных свойств исходных материалов.

**Выводы электродвигателя** – выводы, предназначенные для подключения электродвигателя к питающей сети. Выводы служат также для подключения различной пусковой и регулирующей аппаратуры и измерительных элементов систем защиты. В простейшем случае выводы подключаются к питающей сети через контакторы, автоматы защиты и т. п. Электродвигатели постоянного тока подключаются с помощью двух– или трехжильного кабеля в зависимости от типа сети постоянного тока. Сечение жил питающего кабеля и установка срабатывания тепловых реле защиты выбираются в соответствии с номинальной мощностью электродвигателя. Для присоединения к электродвигателю проводов внешней сети используется **клеммная коробка**. На клеммы этой коробки выводятся либо все выводы обмоток, либо часть их.

**Изоляция лобовых частей обмотки** – изоляция, покрывающая части обмоток электрических машин, расположенные вне паза **якоря**.

В качестве изоляции используются прессшпан, стеклоткань, синтетическая ткань, хлопок, шелк и другие электроизоляционные материалы. Электрические, механические и термические свойства изо-

ляции должны обеспечивать надежность работы МПТ [3, с. 27-29; 5, с. 268-272; 6, с. 20, 21; 7, ч. 1, с. 31-34].

**Изоляция обмотки возбуждения (ОВ).** Под изоляцией обмотки возбуждения, выполненной в виде концентрической катушки, понимают изоляцию провода, межслойную изоляцию и изоляцию полюса, обеспечивающую необходимую электрическую, механическую и термическую прочность обмотки.

Тип используемой в конкретной электрической машине изоляции ОВ зависит от конструкции обмотки и значения напряжения питания. Для обмоток с большим количеством витков и малым сечением провода используется межслойная изоляция из прессшпана, остеклованной ткани или электроизоляционной бумаги. В качестве наружной изоляции ОВ используют хлопчатобумажную ленту или ленту из стеклоткани (тесьму) – позиция 1 на рис. 3.6. Для обмоток с малым количеством витков и большим сечением провода к межслойной изоляции предъявляются менее жесткие требования, поскольку в этих случаях имеется возможность располагать отдельные витки на некотором расстоянии друг от друга. В этом случае стержень полюсного наконечника обматывается миканитовой лентой или на него надевается гильза из довольно жесткого электроизоляционного материала. Особое внимание уделяется изоляции ОВ, установленных на вращающихся полюсах, где первостепенное значение имеет их механическая прочность. В этих обмотках, как правило, используется жесткий медный провод круглого или прямоугольного сечения (позиция 2 на рис. 3.6).

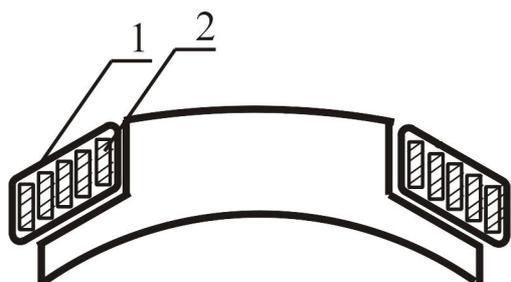


Рис. 3.6

Подобные обмотки нередко пропитываются компаундом, который после высыхания придает обмоткам необходимую электрическую и механическую прочность. Сушка обмоток производится в специальных сушильных печах.

Для изоляции обмоток возбуждения широко используется эпоксидная смола [3, с. 27-29; 5, с. 268-272; 6, с. 20, 21; 7, ч. 1, с. 31-34].

**Изоляция провода** – слой электроизоляционного материала, покрывающий поверхность круглых, прямоугольных и многожильных медных и алюминиевых проводов.

На практике наибольшее распространение получила лаковая и стеклолаковая изоляция. В отдельных случаях используется также изоляция из хлопчатобумажной ткани, синтетических материалов и асбеста. Выбор изоляции провода того или иного типа полностью определяется электрической, механической и тепловой нагрузками электрической машины, что в свою очередь зависит от условий ее эксплуатации [3, с. 27-29; 5, с. 268-272; 6, с. 20, 21; 7, ч. 1, с. 31-34].

**Индуктор электрической машины** постоянного тока – неподвижная часть машины постоянного тока, которая служит для создания магнитного поля машины. Индуктор (рис. 3.7) содержит магнитопровод 1 цилиндрической формы, выполненный из литой электротехнической стали. К магнитопроводу крепятся главные 2 и дополнительные 3 полюсы. На этих полюсах расположены соответственно сосредоточенные обмотки возбуждения, **компенсационная обмотка** и обмотка добавочных полюсов. Полюсы индуктора выполняются массивными или шихтованными. На торце главного полюса, обращенного к якору 4, закрепляется полюсный башмак (наконечник) 5, профиль которого способствует улучшению формы МДС в воздушном зазоре с целью уменьшения высших гармонических составляющих. Полюсные башмаки всегда выполняются шихтованными, поскольку они находятся в переменном магнитном поле. Остальные части магнитопровода индуктора мо-

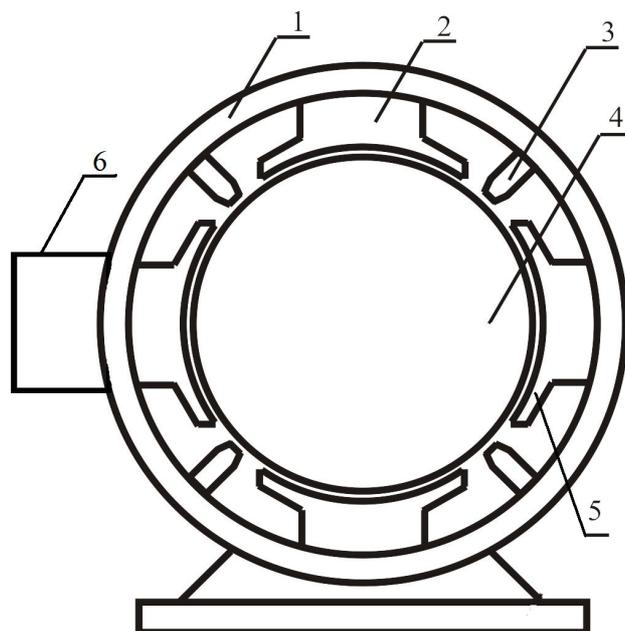


Рис. 3.7

гут быть массивными. В полюсных башмаках главных полюсов машин постоянного тока большой мощности могут выполняться пазы, в которых укладывается компенсационная обмотка. На корпусе индуктора расположены приспособления для центровки ротора и снятия подшипников с вала, а также **клеммная коробка**  $\delta$  для подключения **обмоток якоря** и возбуждения [1, с. 33-34; 2, с. 337, 338; 3, с. 35-38; 4, с. 458-460, 466; 7, ч. 2, с. 199, 200].

**Класс нагревостойкости изоляции** определяется максимальной температурой, при которой изоляция еще сохраняет свои изолирующие свойства. Группа электроизоляционных материалов, обладающих одинаковой термической устойчивостью, относится к одному классу нагревостойкости.

Срок службы обмоток электрических машин и аппаратов полностью определяется диэлектрической, механической и термической прочностями электрической изоляции (витковой, корпусной, пазовой, межслойной и т.д.). В зависимости от класса нагревостойкости используемого в обмотке электроизоляционного материала должен поддерживаться такой режим работы электрической машины, при котором температура обмотки не превышает предельно допустимого для данного класса значения. Класс нагревостойкости изоляции обозначается прописными буквами латинского алфавита, причем каждому классу соответствует своя предельно допустимая температура:  $A - 105$ ;  $E - 120$ ;  $B - 130$ ;  $F - 155$ ;  $H - 180^{\circ}\text{C}$ .

К классу  $A$  принадлежат пропитанные электротехническим лаком или маслом хлопок, бумага, картон или шелк. К классу  $E$  относятся лакоткань, смола и другие материалы с аналогичными свойствами. Класс  $B$  включает асбест, стекловолокно, резину волокнистой структуры, армированную синтетическим материалом [5, с. 268, 269; 6, с. 21; 7, ч. 1, с. 32, 33].

**Клеммная колодка (КК)** – пластина квадратной или прямоугольной формы, выполненная из прочного электроизоляционного материала, на которой закреплены контактные штифты для присоединения выводов обмоток электрических машин и проводов внеш-

них электрических цепей. Пластина крепится на корпусе электрических машин и, как правило, закрывается коробкой. Выводы обмоток и провода внешних электрических цепей присоединяются к КК посредством пайки или винтового соединения. В корпусе электрической машины вырезается окно, предназначенное для вывода концов обмоток, а внешние соединительные провода подводятся к КК через специальное отверстие клеммной коробки. Для предотвращения ошибочного включения обмоток используется маркировка выводов, оговоренная соответствующими ГОСТ. Двигатели постоянного тока содержат КК с числом контактных штифтов от двух до шести. В конструктивном отношении КК должны соответствовать **степени защиты электрической машины от внешних воздействий** и длительно выдерживать номинальный ток.

**Коллектор** – элемент конструкции электрической машины, обеспечивающий **коммутацию** и протекание электрического тока в контуре, образованном **обмоткой якоря** и внешней цепью (рис. 3.8).

Обычно коллектор состоит из нескольких проводящих коллекторных пластин-ламелей 1 трапецеидальной формы, распределенных равномерно по окружности и закрепленных на цилиндрической детали 2 из электроизоляционного материала. Между пластинами должна отсутствовать гальваническая связь.

Ламели могут крепиться к поверхности цилиндрической детали при помощи клея, винтов 3 или бандажных колец. При использовании первого способа крепления ламелей коллектор относится, в отличие от двух других случаев, к неразборным конструкциям. Первый способ применяется для машин малой мощности, остальные способы – для машин средней и большой мощности.

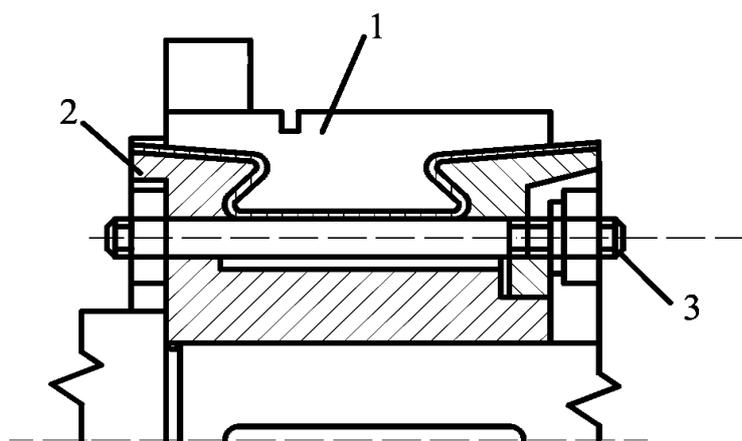


Рис. 3.8

Первый способ применяется для машин малой мощности, остальные способы – для машин средней и большой мощности.

Во время работы коллектор испытывает значительные механические и тепловые перегрузки и поэтому требует тщательного ухода в процессе эксплуатации электрической машины. Особенно важно следить за тем, чтобы поверхность коллекторных пластин оставалась чистой, свободной от грязи, нагара и посторонних предметов, способных привести к замыканию двух и более ламелей. Наиболее просто эта задача решается путем периодической чистки и полировки ламелей [1, с. 29-30, 36; 2, с. 239, 240; 3, с. 39, 40; 4, с. 463, 464; 7, ч. 2, с. 201, 202].

**Конструктивное исполнение по способу монтажа** – конструктивные особенности вращающихся электрических машин, характеризующие способ их монтажа и раскрываемые с помощью классификации и принятых условных обозначений. По указанному признаку машины делятся на девять групп, в каждой из которых возможно восемь вариантов исполнения концов вала [2, с. 242, 243; 5, с. 31; 7, ч. 1, с. 24-26].

**Коэффициент полезного действия (КПД)** – величина, характеризующая полноту преобразования электрической энергии в другие виды энергии и обратного преобразования. Условное обозначение –  $\eta$ .

При преобразовании электрической энергии в другие виды энергии часть исходной электрической энергии выделяется в виде потерь, в результате чего получаемая после преобразования мощность  $P_2$  несколько (иногда значительно) меньше мощности  $P_1$ , подаваемой на вход преобразователя (рис 3.9). Процесс преобразования энергии считается максимально эффективным при  $\eta = 1$ .

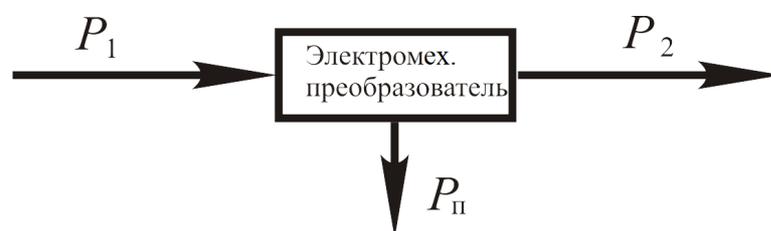


Рис. 3.9

Таким образом  $\eta = P_2 / P_1$ , где  $P_2$  – номинальная используемая мощность;  $P_1$  – полная подведенная мощность.

Суммарные потери  $P_{\text{п}}$  мощности складываются из магнитных  $P_{\text{мг}}$ , электрических  $P_{\text{эл}}$ , механических  $P_{\text{мех}}$  и добавочных  $P_{\text{доб}}$ :

$P_{\Pi} = P_{\text{мг}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ , где  $(P_{\text{мг}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}})$  – основные потери. Основные потери преобразуются в тепло и нагревают отдельные элементы конструкции. Чтобы МПТ не перегревалась и ее массогабаритные показатели были приемлемы, МПТ охлаждают. В качестве охлаждающей среды используются: окружающий воздух, масло (трансформаторное), вода, водород [1, с. 420-422; 2, с. 195, 196; 3, с. 209-211; 4, с. 258-260; 5, с. 127].

**Ламель коллектора** (коллекторная пластина) (см. **коллектор**).

**Магнитные материалы** – материалы, обладающие свойством намагничиваться, т.е. обеспечивать при одинаковой напряженности магнитного поля большее значение индукции, чем в вакууме. Требование к магнитным материалам: высокая **магнитная проницаемость**. К магнитным материалам относятся железо, никель, пермаллой, альсифер и др. Особую группу представляют электротехнические стали. Магнитопроводы **якоря** и главных полюсов выполняют шихтованными из штампованных пластин электротехнической стали [3, с. 24-27; 7, ч. 1, с. 29-31].

**Магнитомягкий материал** – **ферромагнитный материал**, легко намагничивающийся под действием внешнего магнитного поля и имеющий узкую **петлю гистерезиса**, то есть обладающий малыми значениями остаточного намагничивания и коэрцитивной силы. Магнитомягкие материалы широко используются для изготовления магнитопроводов статоров и роторов. При работе машины происходит периодическое перемагничивание отдельных элементов магнитопровода машины, что приводит к его нагреву вследствие выделяемого при этом тепла. Указанные потери носят название потерь на гистерезис (перемагничивание). Значение этих потерь возрастает с увеличением ширины **петли гистерезиса**.

**Магнитотвердые материалы** (см. **постоянный магнит**).

**Маркировка выводов** – система цифровых и буквенных обозначений выводов обмоток электрических машин.

**Машина постоянного тока** – электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую

энергию постоянного тока или электрической энергии постоянного тока (в том числе пульсирующей) в механическую или электрическую энергию постоянного тока другого напряжения.

Характер преобразования энергии в МПТ определяется режимами работы двигателя или генератора. Корпус МПТ выполняется в виде полого цилиндра из электротехнической стали, внутри которого закреплены главные полюсы с обмоткой возбуждения (МПТ с внешними полюсами). Магнитное поле машины может также создаваться **постоянными магнитами** (рис. 3.10).

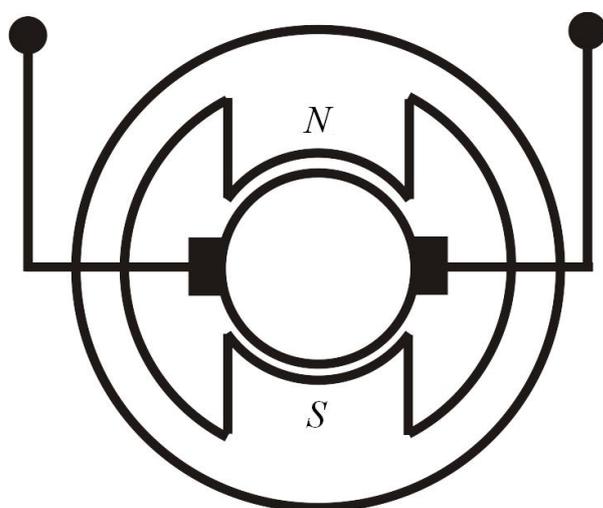


Рис. 3.10

Магнитопровод **якоря 1** (рис. 3.11) изготавливается из шихтованной электротехнической стали и закрепляется на валу ротора. В пазы якоря уложена обмотка якоря, выводы **секций** которой припаиваются к пластинам **коллектора**. Токосъем с коллектора производится при помощи **щеток**, через которые осуществляется

гальваническая связь обмотки якоря с внешней электрической цепью.

Для улучшения процесса **коммутации** в щеточно-коллекторном узле в мощных МПТ устанавливаются дополнительные полюсы 2, расположенные между главными полюсами 3 на оси **геометрической нейтрали**.

На главных полюсах может быть расположена **компенсационная обмотка 4**, включенная последовательно с обмоткой якоря. МПТ изготавливаются на мощности от 0,2 Вт до 6,6 МВт [6, с. 7-9; 7, ч. 2, с. 195-203].

**Машинное изготовление обмотки** – автоматический процесс намотки и укладки в пазы магнитной системы статора или ротора **секций** обмоток машин постоянного тока. Машинное изготовление обмотки наиболее эффективно при массовом производстве электрических машин и часто используется при изготовлении коллекторных машин постоянного тока. Укладка секций в пазы производится с помощью

приспособления с программным управлением, позволяющего укладывать обмотки с постоянными и переменными шагами. После укладки секций в пазы производятся формовка лобовых частей, включая бандажировку, а также пропитка электроизоляционным лаком и сушка. В коллекторной машине постоянного тока выводы секций автоматически припаиваются к пластинам **коллектора**. На автоматической линии производится также автоматический контроль качества изготовления обмотки.

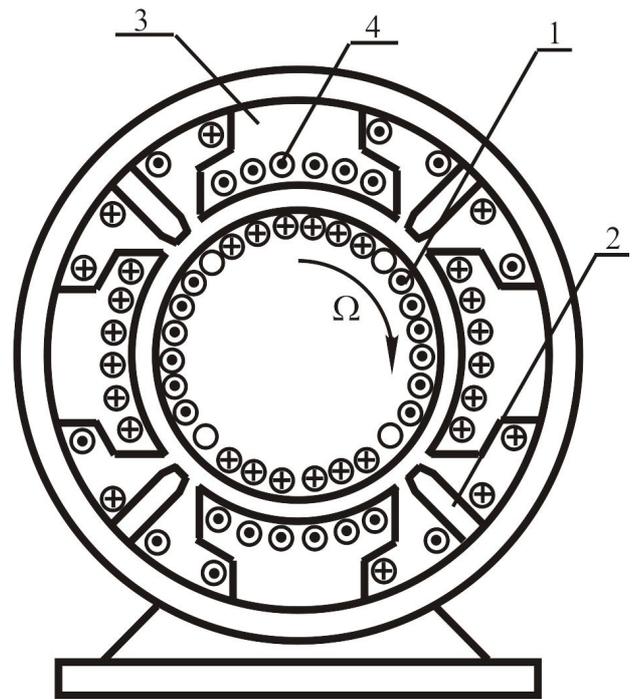


Рис. 3.11

**Нагрузка (Н)** – совокупность устройств, принимающих энергию, выработанную электромагнитными преобразователями энергии.

Электрическая машина работает с номинальной  $N$  в том случае, если напряжение на ее зажимах, температура, частота вращения соответствуют с некоторой точностью значениям указанных параметров, оговоренных ГОСТ и ТУ.

**Надежность изоляции** – вероятность сохранения прочности изоляционного материала во всем диапазоне изменения температуры и влажности окружающей среды и значений напряжений в нормальных и аварийных режимах работы.

**Направление вращения (НВ)** определяется со стороны конца вала электрической машины, соединенного с рабочей машиной. При этом считают, что двигатель имеет прямое НВ, если его ротор вращается против часовой стрелки. В двигателях постоянного тока изменение НВ (реверс НВ) производится изменением полярности напряжения, приложенного к якорной обмотке или к обмотке возбуждения.

**Напряжение пробоя изоляции** характеризует максимально возможное напряжение, выдерживаемое электроизоляционным материалом без потери им электрической прочности.

**Независимое возбуждение** – один из способов создания магнитного поля электрических машин, согласно которому энергия в обмотку возбуждения подается от постороннего источника постоянного тока, не имеющего электрической связи с главной цепью возбуждаемой машины – цепью **якоря** (рис. 3.12) [1, с. 172-174; 2, с. 372, 373; 3, с. 197, 229].

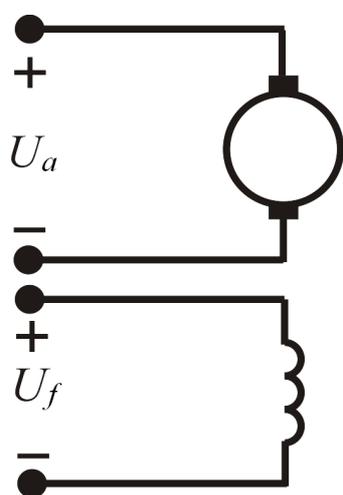


Рис. 3.12

**Номинальный режим** работы генератора – такой режим, когда напряжение на зажимах генератора равно номинальному напряжению, ток генератора равен номинальному току машины и скорость вращения вала машины равна номинальному значению. Номинальный режим работы генератора необходимо рассматривать как предельный режим продолжительной работы генератора, при котором температура всей машины не поднимается выше допустимого значения при предельных параметрах окружающей среды.

Режимы работы генератора постоянного тока можно пояснить с помощью диаграммы, изображенной на рис. 3.13.

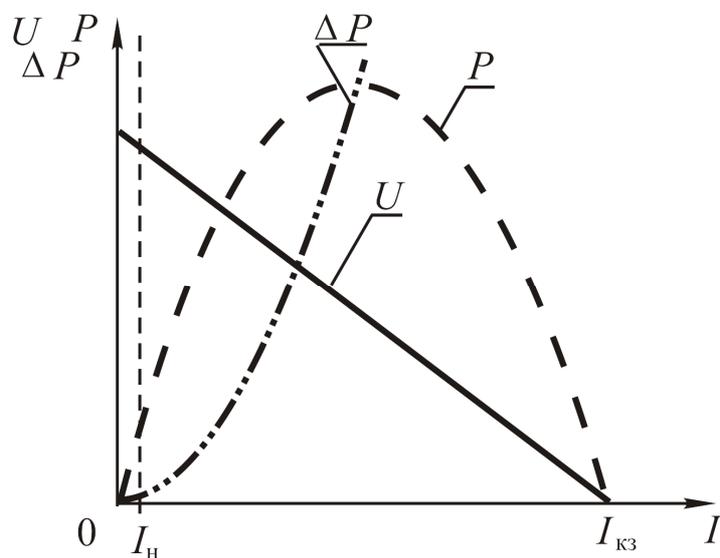


Рис. 3.13

На диаграмме:  $U$  – напряжение на зажимах генератора,  $I$  – ток генератора, изменяющийся от нуля (режим холостого хода) до максимального значения (ток короткого замыкания),  $P$  – мощность генератора, отдаваемая нагрузке,  $\Delta P$  – мощность потерь в генераторе.

Генератор отдает максимальную мощность нагрузке тогда, когда мощность нагрузки равна мощности потерь в генераторе. Этот режим работы находится за пределами допустимых значений параметров. Область допустимых значений

токов генератора находится в пределах от нуля до номинального тока  $I_n$ . Данная диаграмма справедлива в том случае, когда не учитывается размагничивающее действие реакции якоря.

**Обмоточная изоляция** – изоляция обмоток электрических машин, обеспечивающая необходимую электрическую и термическую прочность обмоток.

Изоляционные материалы могут быть в твердом и жидком состоянии. В качестве твердой изоляции используется бумага, стекловолокно, хлопок, шелк. В качестве жидкой изоляции используется масло. Другие виды изоляционных материалов перед использованием могут быть в жидком или пастообразном состоянии (пропиточные электротехнические лаки, компаунды). Однако в работающих устройствах они находятся в твердом состоянии.

Для повышения прочности обмоточной изоляции часто используют комбинацию указанных изоляционных материалов, т. е. изолируют обмотки с последующей пропиткой компаундом и сушкой [3, с. 27-29; 5, с. 268-272; 6, с. 20, 21; 7, ч. 1, с. 31-34].

**Опора подшипника** – неподвижная часть электрической машины, в которую монтируется подшипник. В качестве опоры в электрических машинах используются подшипниковые щиты и стойки. Подшипниковый щит является конструктивным элементом электрической машины и крепится к торцу статора. Подшипниковый щит центрирует ротор относительно статора. Подшипниковые стойки устанавливаются на фундаменте вместе с корпусом электрической машины, при этом часто подшипник устанавливается и в подшипниковом щите, т. е. указанные функции в этом случае распределяются между подшипниковым щитом и стойкой. Опоры подшипников изготавливаются из чугуна, стального листа или сплавов алюминия, а в электрических машинах малой мощности – из металлокерамики или синтетических материалов – и выполнены в виде втулок или конусов, запрессованных в корпус машины. В электрических машинах большой мощности опоры подшипников имеют кольцевые каналы и масляные камеры. Способы их крепления в корпусах электрических ма-

шин весьма многочисленны и выбираются с учетом требований к технологии изготовления и ремонта, условий эксплуатации и т.д.

**Остаточное намагничивание, остаточная индукция (см. петля гистерезиса).**

**Охлаждение электрических машин** – отвод тепла от активных частей вращающихся электрических машин.

При прохождении тока по обмоткам электрических машин в них выделяется тепло, что приводит к нагреву обмоток. Если температура нагрева превышает значение, допустимое для используемой изоляции, то происходит ее тепловое старение или термическое разрушение. В результате изоляция теряет электрическую и механическую прочность, что может явиться причиной ее повреждения и нарушения работоспособности электрической машины. Для поддержания требуемого температурного режима служит охлаждение.

Эффективность того или иного способа охлаждения определяется теплопроводностью изоляции и теплоемкостью хладагента, а также характером и скоростью его перемещения внутри и вне электрической машины. В качестве хладагента используются воздух, вода, масло и т. д. Жидкий хладагент может служить для охлаждения как ротора, так и статора электрической машины, причем направление его движения может быть свободным или упорядоченным [1, с. 165-171; 2, с. 237-239; 4, с. 216-220; 5, с. 281-286; 6, с.127-130].

**Петля гистерезиса** – зависимость между индукцией  $B$  и напряженностью  $H$  магнитного поля в ферромагнитном сердечнике (рис. 3.14).

При намагничивании **ферромагнитного вещества** во внешнем магнитном поле по мере увеличения его напряженности происходит увеличение значения индукции. На начальном участке кривой намагничивания приращение напряженности  $H$  вызывает значительное приращение индукции. При дальнейшем увеличении напряженности темп роста индукции уменьшается, а затем рост практически прекращается. В этом случае говорят, что ферромагнитное вещество находится в состоянии насыщения. При последующем снижении напряженности до зна-

чения  $H_1$  индукция принимает значение  $B_1$  в отличие от значения  $B_2$ , соответствующего напряженности  $H_1$  при намагничивании вещества. При снижении напряженности до нулевого значения в ферромагнитном веществе сохраняется остаточная индукция ( $B_r$ , на рис. 3.14), поскольку его элементарные области спонтанного намагничивания (домены) частично сохраняют ориентацию относительно существовавшего внешнего поля. Таким образом, для ферромагнитного вещества характерно явление остаточной намагниченности. Для устранения остаточной намагниченности необходимо изменить направление внешнего магнитного поля на обратное, причем значение напряженности обратного поля, обращающее в нуль значение индукции в ферромагнитном веществе, называется коэрцитивной силой и обозначается  $H_c$  (рис. 3.14). При снижении напряженности до нуля, последующем изменении ее знака и увеличении до некоторого значения вновь наступает насыщение ферромагнитного вещества, т. е. совокупность значений индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $H$  в ферромагнитном веществе образует замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса. В отличие от магнитомягких материалов магнитотвердые имеют высокие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы.

В практических расчетах магнитопроводов электрических машин чаще всего используют усредненную кривую намагничивания (на рис. 3.14 показана пунктирной линией.)

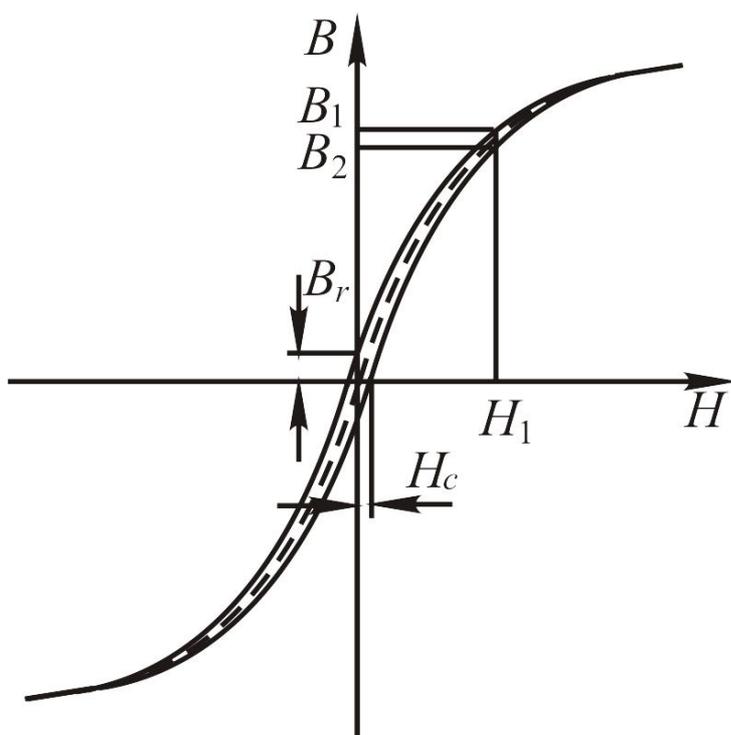


Рис. 3.14

**Подшипник** – конструктивный элемент электрической машины, обеспечивающий свободное вращение вала относительно неподвижной части машины.

Подшипники служат для ориентации ротора электрической машины относительно статора и обеспечения его свободного вращения. Подшипники выдерживают как радиальную, так и аксиальную нагрузку. Различают подшипники скольжения и качения. Выбор того или иного типа подшипника определяется конструктивными особенностями, условиями эксплуатации, степенью защиты от внешних воздействий и требованиями к уровню шума электрической машины.

**Подшипник качения (ПК)** – тип подшипника, в котором между подвижным и неподвижным кольцами (обоймами) перекатываются стальные шарики или ролики. Различают шариковые и роликовые ПК. Шариковые ПК, называемые иначе радиальными, используются при преобладании радиальных нагрузок, а роликовые ПК, называемые аксиальными, – при преобладании аксиальных нагрузок.

Срок службы ПК зависит от их конструктивных особенностей, условий эксплуатации и смазки. В настоящее время ресурс ПК до первого осмотра составляет 4000÷8000 часов непрерывной работы. После этого ПК следует промыть бензином и смазать соответствующей смазкой. Полость ПК заполняется смазкой на  $\frac{2}{3}$  своего объема, поскольку излишняя смазка может привести к перегреву и разрушению ПК. Преимущество ПК перед подшипниками скольжения заключается в меньшем расходе смазочного материала, высокой надежности, минимальных эксплуатационных расходах и легкости замены.

**Подшипник скольжения (ПС)**, установленный между вращающимся валом и корпусом, – конструктивный элемент электрической машины, работа которого основана на использовании трения скольжения.

Небольшие ПС изготавливаются из сплава графита и бронзы, и к ним предъявляются жесткие требования по допусковому разбросу размеров. Они не требуют ухода и обладают низким уровнем шума. Эти ПС используются в электрических микромашинах. Крупные ПС изготавли-

ются из сплава бронзы с цинком или оловом. Конструктивно они часто выполняются в виде буксы, заливаемой тем или иным сплавом. В крупных ПС смазка осуществляется через специальные отверстия вала машины с использованием масляных камер.

В этом случае уже в процессе разгона электрической машины между рабочей поверхностью ПС и поверхностью вала образуется тонкая масляная пленка, снижающая трение скольжения и износ ПС. По специальным дренажным отверстиям отработанное масло вновь поступает в масляную камеру и т. д. В мощных электрических машинах система смазки ПС работает при избыточном давлении с последующей очисткой и охлаждением отработанного масла. В таких машинах ПС является одним из наиболее ответственных узлов, вследствие чего производится контроль его температуры с аварийным отключением электрической машины при недопустимом увеличении температуры. Обычно ПС используются в электрических машинах с горизонтальным и вертикальным расположением вала. Основное преимущество ПС заключается в их высокой перегрузочной способности и малом уровне шума.

**Подшипниковый щит (см. опора подшипника).**

**Полюсное деление** – полюсное деление определяется углом поперечного сечения электрической машины, соответствующим одному полюсу. Полюсное деление численно равно углу между соседними осями симметрии поперечного сечения машины, проходящими в межполюсном пространстве, или углу между осями симметрии двух соседних полюсов и выражается в градусах (иногда в зубцовых делениях) (рис. 3.15).

**Полюсный башмак (см. индуктор электрической машины).**

**Постоянный магнит** – деталь, изготовленная из ферромагнетика, намагниченная в процессе изготовления мощным внешним магнитным полем,

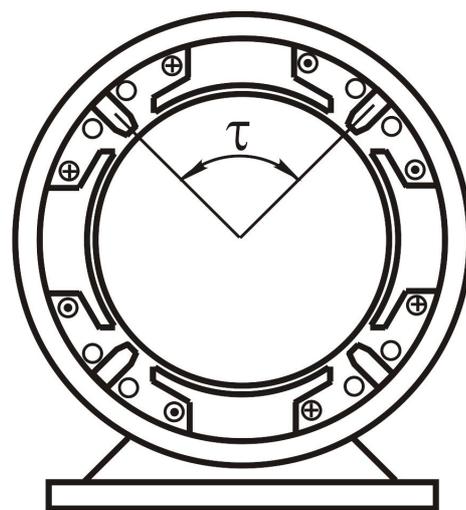


Рис. 3.15

в результате чего имеющая высокое значение остаточного намагничивания. Магнитные свойства постоянного магнита сохраняются длительное время.

Постоянные магниты изготавливаются из легированных сталей и специальных сплавов (альнико – сплава алюминия, никеля, кобальта, стали). Особенно высоким значением остаточного намагничивания обладают ферромагнитные материалы, изготавливаемые из порошка окисла железа и бария и из редкоземельных металлов. Постоянные магниты широко используются в электрических машинах малой мощности для создания потока возбуждения.

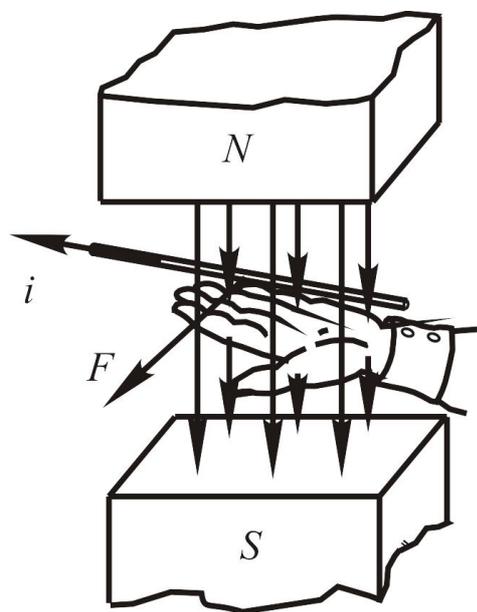


Рис. 3.16

**Правило левой руки** – правило определения направления механической силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле.

Если расположить левую руку таким образом, что силовые линии магнитного поля будут входить в ладонь, а вытянутые пальцы направить по току, то отогнутый большой палец покажет направление действующей силы (рис. 3.16). Векторы индукции магнитного поля, тока и силы расположены под углом

$90^{\circ}$  [1, с. 28; 2, с. 7, 8].

**Правило правой руки** – правило определения направления ЭДС в проводнике, движущемся в электромагнитном поле.

Если расположить правую руку таким образом, что силовые линии магнитного поля будут входить в ладонь, а отогнутый большой палец направить по направлению вращения ротора, то вытянутые пальцы покажут направление ЭДС в проводнике. Векторы силовых линий, ЭДС и направления вращения расположены под углом  $90^{\circ}$ .

Правило правой руки может быть использовано также для определения направления силовых линий электромагнитного поля, созда-

ваемого внутри обмотки с током. При этом четыре пальца располагаются в соответствии с направлением тока, а отогнутый большой палец указывает направление силовых линий (рис. 3.17) и местонахождение северного полюса [1, с. 28; 2, с. 7, 8; 3, с. 33].

**Правило правоходового винта (правило Максвелла)** – правило определения направления ЭДС, наведенной в проводнике, движущемся в магнитном поле, и направления векторов индукции магнитного поля проводника с током.

Если закручивать правоходовой винт так, что его острие будет двигаться по направлению силовых магнитных линий при возрастании потока, то положительное направление ЭДС будет совпадать с направлением вращения головки этого винта.

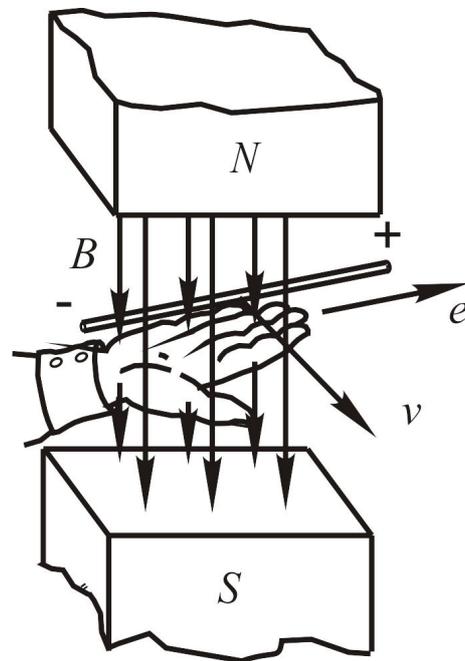


Рис. 3.17

Если закручивать правоходовой винт так, что его острие будет двигаться по направлению тока в проводнике, то направление вектора индукции будет совпадать с направлением вращения головки этого винта.

**Предельно допустимое напряжение** – максимально допустимое для данного класса изоляции значение напряжения, при котором еще сохраняется ее электрическая прочность, то есть отсутствует пробой или перекрытие слоя изоляции.

**Принцип действия электрической машины** – совокупность физических процессов и явлений, на которых основана работа электрической машины. Принцип действия электрической машины основан на использовании двух явлений: на взаимодействии электрического тока в проводнике с магнитным полем; на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим принцип действия двигателя постоянного тока, используя рис. 3.18.

При подключении машины к сети постоянного тока в обмотке возбуждения, расположенной на главных полюсах машины, будет

протекать ток, который создаст магнитный поток в магнитной цепи, состоящей из статора, главных полюсов, воздушного зазора и ротора машины. В воздушном зазоре машины будет создано магнитное поле, представленное магнитными силовыми линиями. Обмотка якоря также подключена к сети постоянного тока, и по её проводникам протекает ток. Она представлена на рисунке проводниками, распределенными по поверхности якоря в воздушном зазоре. Направление тока в проводниках показано на сечении проводника. На каждый проводник якорной обмотки действует механическая сила, пропорциональная индукции магнитного поля, длине проводника и силе тока  $F_{\text{элм}} = B_x li$ , где  $B_x$  – индукция магнитного поля в месте расположения проводника,  $l$  – длина проводника,  $i$  – сила тока проводника.

Направления сил  $F_{\text{элм}}$ , действующих на проводники, находящиеся под северным и южным полюсами, показаны на рисунке стрелками. Направления сил можно принять совпадающими с направлениями касательных к поверхности якоря в местах расположения проводников.

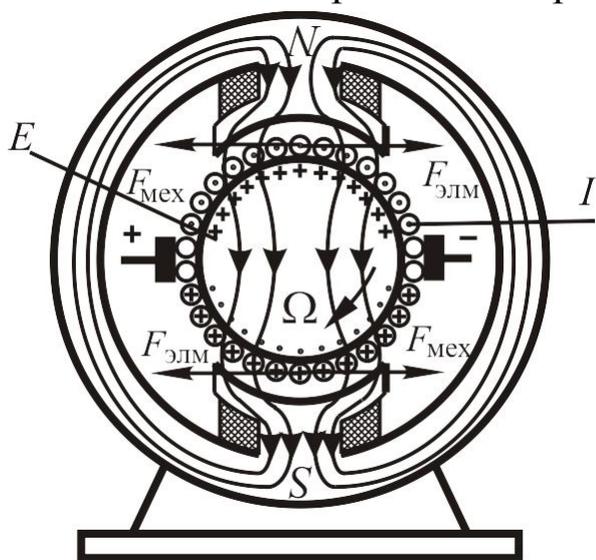


Рис. 3.18

Суммарное взаимодействие всех проводников обмотки якоря с магнитным полем машины создает механический момент на валу двигателя  $M = C_m I_a \Phi$ , где  $M$  – механический момент на валу двигателя,  $C_m$  – постоянная, зависящая от конструкции машины,  $I_a$  – ток якоря,  $\Phi$  – магнитный поток.

Под действием механического момента якорь машины начинает вращаться со скоростью  $n$ . Одновременно в каждом проводнике якоря, перемещающемся в магнитном поле машины, наводится ЭДС  $e_x = B_x lv$ . Суммарная электродвижущая сила всей якорной обмотки может быть определена из уравнения  $E = C_e n \Phi$ , где  $E$  – ЭДС обмотки якоря,  $C_e$  – постоянная, зависящая от конструкции машины,  $n$  – частота вращения якоря,  $\Phi$  – магнитный

поток машины,  $v$  – линейная скорость перемещения проводника в магнитном поле.

Направления электродвижущих сил проводников на рис. 3.18 показаны точками и крестиками, расположенными рядом с проводниками. Следует обратить внимание на несовпадение направлений токов и ЭДС проводников. Поэтому ЭДС якоря в двигателях называют иногда противо-ЭДС, подчеркивая то, что электродвижущая сила обмотки якоря противодействует приложенному напряжению и току якоря [1, с. 28-33; 2, с. 7-9, 334-337; 3, с. 32-35; 4, с. 455-458].

**Проводниковые материалы** – материалы, имеющие свободные электрические заряды и способные пропускать электрический ток. Ряд материалов используется для изготовления провода. Требования к проводниковым материалам, из которых изготавливают проводники: малое удельное электрическое сопротивление, теплопроводность, относительная дешевизна. Этим требованиям удовлетворяют медь, алюминий, бронза [3, с. 24; 7, ч. 1, с. 31].

**Рабочий конец вала (РКВ)** электрической машины используется для механической связи с первичным двигателем или рабочей машиной и присоединяется у двигателей непосредственно или через передаточное устройство к производственному механизму, у генераторов – к первичному двигателю, например к двигателю внутреннего сгорания.

**Режим работы электрической вращающейся машины** – установленный порядок чередования и продолжительности **нагрузки, холостого хода, торможения, пуска и реверса** электрической машины во время ее работы.

Основным является номинальный режим, при котором двигатель при номинальной частоте вращения имеет номинальную нагрузку. Отклонение от этого режима вследствие, например, увеличения числа пусков или перегрузки двигателя приводит к перегреву обмоток, к старению изоляции и к снижению срока службы машины. По этой причине допускается лишь кратковременная перегрузка машины, причем чем больше ее значение, тем меньше время, в течение которого машина может работать в этом режиме. Для электрических машин выделяют следующие режимы работы: номинальный продолжительный, кратко-

временный, повторно-кратковременный, перемежающийся [1, с. 159-162; 2, с. 235, 236; 4, с. 220-222; 5, с. 293-300; 7, ч. 2, с. 322-328].

**Силовое действие магнитного поля** распространяется как на **ферромагнитные вещества**, так и на проводники с током.

В первом случае оно проявляется в притягивании частиц магнитомягкого материала к **постоянному магниту** или **электромагниту**. Этот эффект широко используется в коммутационных аппаратах (реле, контакторах и т. п.) и в различных электромагнитных устройствах (электромагнитных клапанах, электромагнитных плитах).

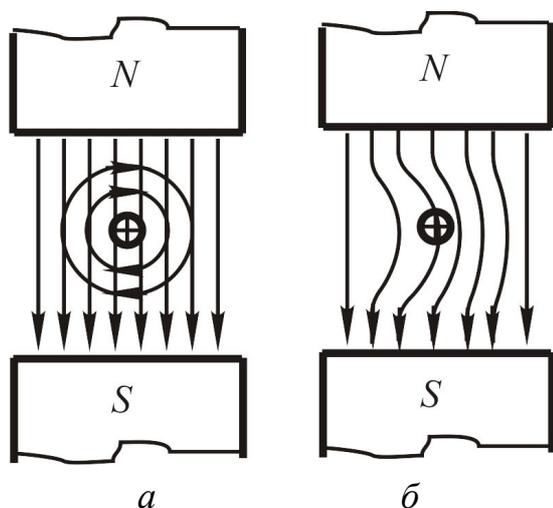


Рис. 3.19

Во втором случае проводник с током, помещенный во внешнее магнитное поле (рис. 3.19, а) и имеющий собственное магнитное поле, искажает внешнее магнитное поле (рис. 3.19, б). Это приводит к ослаблению магнитного поля с одной стороны проводника и к усилению поля с другой его стороны. При этом на проводник действует сила  $F$ , значение которой пропорционально индукции  $B$  магнитного поля, активной длине  $l$  проводника и значению тока  $I$  в нем, т. е.  $F = B \cdot l \cdot I$ . Эта механическая сила действует в направлении ослабленного магнитного поля. На этом принципе основана работа вращающихся электрических машин.

Силовое действие магнитного поля проявляется также и в том случае, если по двум расположенным параллельно проводникам протекает электрический ток. Указанные токи создают вокруг проводников магнитные поля, взаимодействие которых приводит к тому, что при одинаковом направлении токов проводники смещаются в направлении друг к другу, а при разных направлениях токов проводники смещаются в обратном направлении. Наиболее значительными эти усилия оказываются при протекании через проводники токов короткого замыкания, что может привести к их повреждению.

Силовое действие магнитного поля проявляется также и в том случае, если по двум расположенным параллельно проводникам протекает электрический ток. Указанные токи создают вокруг проводников магнитные поля, взаимодействие которых приводит к тому, что при одинаковом направлении токов проводники смещаются в направлении друг к другу, а при разных направлениях токов проводники смещаются в обратном направлении. Наиболее значительными эти усилия оказываются при протекании через проводники токов короткого замыкания, что может привести к их повреждению.

**Смешанное возбуждение** – электромагнитное возбуждение машины постоянного тока, в которой магнитное поле машины является результатом воздействия намагничивающих сил двух обмоток (рис. 3.20), одна из которых включена параллельно обмотке якоря (шунтовая обмотка Ш<sub>1</sub>Ш<sub>2</sub>), а другая – последовательно с ней (серийная обмотка С<sub>1</sub>С<sub>2</sub>) [1, с. 172-173; 2, с. 372, 373; 3, с. 197, 229].

**Способ возбуждения** – способ создания магнитного поля (возбуждения) в машинах постоянного тока.

Существуют два основных способа: **электромагнитное возбуждение** и возбуждение от **постоянных магнитов**. Преимущество последнего заключается в отсутствии дополнительного источника электроэнергии для питания обмотки возбуждения. К недостаткам способа возбуждения от постоянных магнитов относятся сложность регулирования потока возбуждения и зависимость свойств постоянных магнитов от температуры и механических воздействий (ударов, вибраций).

**Способы охлаждения вращающихся электрических машин.** По способам охлаждения электрические машины классифицируются следующим образом:

- в зависимости от наличия или отсутствия вентилятора различают машины соответственно с искусственным и с естественным охлаждением;
- в зависимости от того, какие части в машинах с искусственной вентиляцией обдуваются воздухом, различают обдуваемые и продуваемые машины;
- в зависимости от направления движения охлаждающей среды относительно активных частей в машинах с внутренней вентиляцией различают машины с аксиальной, аксиально-радиальной и радиальной вентиляцией;

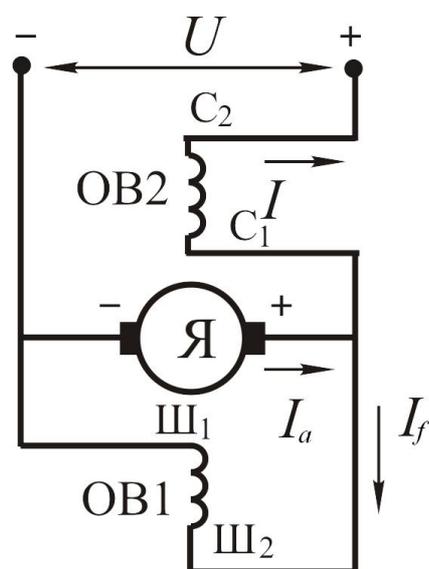


Рис. 3.20

– в зависимости от способа охлаждения нагретого в машине хладагента различают машины с разомкнутой или протяжной системой вентиляции и машины с замкнутой системой вентиляции;

– в зависимости от того, какое вещество применяется в качестве охлаждающей среды, различают машины с воздушным, водородным, водяным и масляным охлаждением. В одной машине можно применить одновременно несколько охлаждающих сред. Если охлаждение обеспечивается за счет испарения, то система охлаждения называется испарительной;

– в зависимости от способа охлаждения обмоток различают машины с косвенным (поверхностным) и с непосредственным (внутренним) охлаждением [1, с. 165-171; 2, с. 237-239; 4, с. 216-220; 5, с. 281-286; 6, с. 127-130].

**Степень защиты электрических машин от внешних воздействий** – действенность тех или иных средств на вращающейся электрической машине, предназначенных для защиты от попадания в нее пыли, влаги и посторонних предметов.

Степень защиты машины от внешних воздействий определяется условиями эксплуатации, на которые рассчитана электрическая машина с учетом области ее использования. Абсолютная защита машины от всех возможных воздействий без учета указанных факторов экономически нецелесообразна.

Электрические машины по степени защиты от твердых предметов подразделяются на машины: незащищенного исполнения; с защитой от попадания внутрь посторонних предметов размером более 50; 12; 2,5; 1,0 мм; с защитой от попадания внутрь пыли в свободном состоянии и под давлением. По степени защиты от попадания внутрь влаги различают машины: с защитой от отдельных капель; от дождя; от воды под давлением [2, с. 240, 241; 5, с. 32; 7, ч. 1, с. 17-20].

**Удельное сопротивление проводника** – физическая величина, характеризующая способность проводника, изготовленного из определенного материала, проводить электрический ток.

Условное обозначение –  $\rho$ , единица измерения – Ом•мм<sup>2</sup>/м;  $\rho = RS/l$ , где  $R$  – сопротивление, Ом;  $S$  – сечение, мм<sup>2</sup>, и  $l$  – длина провода, м.

Удельное сопротивление проводов определяется как сопротивление провода длиной 1 м и сечением 1 мм<sup>2</sup>. Для медного проводника  $\rho = 0,0178 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$ , для алюминия  $\rho = 0,0286 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$ .

**Условное обозначение конструктивного исполнения по способу монтажа.** Условное обозначение электрической машины состоит из буквенной части *ИМ* и следующих за ней четырёх цифр. Первая цифра является номером группы, в которую входит машина по конструктивному исполнению. Всего имеется 9 групп, в каждой из которых машины подразделяются в зависимости от способа монтажа (вторая и третьи цифры в условном обозначении). Количество и исполнение концов вала обозначаются с помощью четвёртой цифры. Пример условного обозначения электрической машины с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с горизонтальным валом и одним цилиндрическим концом вала: *ИМ 1001* [2, с. 242, 243; 7, ч. 1, с. 24-26].

**Условное обозначение режимов работы** в соответствии с ГОСТ принято следующее: номинальный продолжительный; кратковременный; кратковременный с частыми пусками; повторно-кратковременный; повторно-повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением; перемежающийся; перемежающийся с разными частотами вращения [1, с. 159-161; 2, с. 235, 236; 4, с. 220-222; 5, с. 293-300; 7, ч. 2, с. 322-328].

**Установившееся состояние** – работа электрической вращающейся машины при неизменных электромагнитных, тепловых и механических параметрах.

**Характер (режим) работы электрической машины** отражает направление преобразования энергии. При вращении электрической машины с помощью какого-либо механического устройства машина работает в режиме генератора, то есть происходит преобразование механической энергии в электрическую. При работе в режиме двигателя электрическая машина получает электроэнергию от питающей сети и преобразует ее в механическую энергию. Характерно, что большинство электрических машин являются обратимыми, т.е. могут без каких-либо конструктивных переделок работать в обоих режимах работы.

**Щетка (Щ)** – токопроводящий элемент, непосредственно соприкасающийся с **коллектором** или контактным кольцом, предназначенный обеспечивать электрическую связь подвижной и неподвижной частей электрической машины.

В зависимости от мощности машины и условий ее эксплуатации к Щ предъявляются различные требования, что находит отражение в технологии их изготовления. Различают Щ жесткие и мягкие. Жесткие Щ изготавливаются из углерода со связующими компонентами, после формовки прессованием Щ подвергаются термической обработке. Эти Щ обладают невысокой электрической, механической и термической устойчивостью и большим переходным сопротивлением. Однако они позволяют улучшить процесс **коммутации**. Одним из способов повышения электрической и механической прочности жестких Щ является отжиг. К мягким Щ относятся графитовые Щ, выдерживающие большую токовую нагрузку. Наименьшим переходным сопротивлением обладают Щ с добавками медного и бронзового порошка. Они используются в электрических машинах с большим током и низким напряжением.

Обычно Щ крепится в **щеткодержателе** с помощью нажимной пружины, которая также регулирует положение Щ по мере ее износа. При замене изношенной щетки на новую необходимо притирать рабочую поверхность Щ к поверхности коллектора с целью увеличения площади контакта. Существующие конструкции щеткодержателей позволяют регулировать давление Щ на контактную поверхность. Щеткодержатели обеспечивают также отвод Щ от поверхности коллектора [3, с. 40; 7, ч. 1, с. 34; ч. 2, с. 203].

**Щеткодержатель** – элемент конструкции электрической машины, обеспечивающий контакт щетки с коллектором или контактным кольцом и состоящий из обоймы, щеткодержателя, системы нажатия, элемента крепления.

**ЭДС проводника** – ЭДС, возникающая вследствие перемещения проводника в **магнитном поле** в соответствии с **законом электромагнитной индукции**. В соответствии с этим законом во всяком

проводнике, перемещающемся с некоторой скоростью в магнитном поле, наводится ЭДС. Значение ЭДС пропорционально индукции  $B$  магнитного поля, активной длине  $l$  проводника и скорости  $v$  его перемещения в магнитном поле. Под активной длиной проводника понимается та его часть, которая расположена в магнитном поле. В том случае, когда направление движения проводника перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля, ЭДС можно определить из выражения  $E = B \cdot l \cdot v$ .

**Электрическая вращающаяся машина** – электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую энергию вращения, механической энергии вращения в электрическую.

**Электрическая мощность** – физическая величина, равная отношению электрической энергии к промежутку времени, в течение которого эта энергия рассеивается. Условное обозначение –  $P$ , единица измерения – ватт (Вт). Электрическая мощность равна произведению напряжения и тока ( $P = U \cdot I$ ) или отношению электрической энергии ко времени ( $P = W/t$ ).

**Электрическая работа** – физическая величина, характеризующая процесс преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Обозначение –  $W$ , единица измерения – джоуль (Дж). Если принять, что в некоторой электрической цепи ток  $I$  и напряжение  $U$  не зависят от времени, то электрическая работа может быть определена из выражения  $W = U \cdot I \cdot t$ , где  $t$  – время. Работа в 1 Дж = 1 Вт·с = 1 В·А·с. На практике наибольшее распространение получили единицы измерения Вт·ч и кВт·ч: 1 Вт·ч =  $3,6 \cdot 10^2$  Дж; 1 кВт·ч =  $3,6 \cdot 10^5$  Дж.

**Электрическая схема (схема электрической цепи)** – графическое представление электрической цепи с помощью условных обозначений.

**Электрическая схема соединений** – электрическая схема, отображающая используемые в том или ином устройстве электрические машины и аппараты с входными и выходными зажимами и подключенные к ним соединительные провода.

Электрическая схема соединений является основным документом, по которому проводятся монтажные работы на электрических установках.

На электрической схеме должны быть представлены обозначения зажимов машин и аппаратов, тип, сечение и количество жил соединительных проводов и кабелей. В практике проектирования электрическую схему соединений называют также схемой внешних соединений.

**Электромагнитная индукция** – явление возбуждения ЭДС в контуре при изменении магнитного потока, сцепленного с ним. Явление положено в основу преобразования энергии в электрических машинах и отражено в **законе электромагнитной индукции**.

**Электромагнитное возбуждение** – способ создания магнитного поля электрической машины. Различают независимое возбуждение и **самовозбуждение**.

**Электромагнитное поле** – вид материи, определяемый во всех точках четырьмя векторными величинами, которые характеризуют две его стороны, называемые соответственно электрическим полем и магнитным полем. Эти поля оказывают силовое воздействие на заряженные частицы, зависящее от их скорости и величины их заряда.

Обычно электромагнитное поле образуется вокруг проводника, по которому протекает электрический ток (рис. 3.21, а). Магнитное поле соленоида показано на рис. 3.21, б. Направление силовых линий электромагнитного поля зависит от направления тока в проводнике и определяется по **правилу правого винта**.

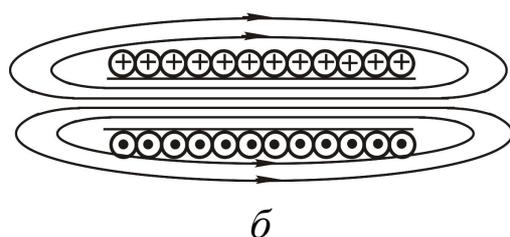
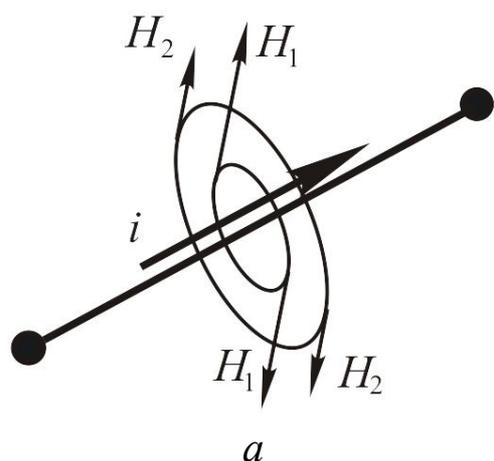


Рис. 3.21

электромагнитного поля зависит от направления тока в проводнике и определяется по **правилу правого винта**.

**Электропроводящий материал** – вещество, основным электрическим свойством которого является электропроводность.

В металлах и их сплавах протекание электрического тока является следствием направленного движения носителей заряда – свободных электронов. Последние не имеют жесткой связи с кристаллической

решеткой металла. Различная проводимость различных металлов и сплавов обусловлена разным количеством в них свободных электронов на единицу объема, а также их подвижностью. В меди удельное содержание свободных электронов составляет  $3,4 \cdot 10^{22}$  на  $1 \text{ см}^3$ , в алюминии –  $2,2 \cdot 10^{22}$  на  $1 \text{ см}^3$ .

**Якорь** – часть электрической машины, в которой происходит преобразование электрической энергии в механическую или наоборот. Якорь содержит обмотку (рис. 3.22), при вращении которой в магнитном поле в ней наводится ЭДС. Электрическая схема якоря МПТ и условное обозначение якоря в схемах приведены соответственно на рис. 3.22, а и 3.22, б [1, с. 35; 2, с. 338, 339; 3, с. 38, 39; 5, с. 460-463; 7, ч. 2, с. 200, 201].

Знания по данной теме применяются в решении производственных задач, при прогнозировании определенных ситуаций. Необходимо дать ответ, например, на такой вопрос.

Что произойдет, если двигатель, предназначенный для кратковременной или повторно-кратковременной работы (например, крановый или тяговый), будет эксплуатироваться длительно? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

Ответ. Равномерно перегрета вся машина. Других признаков ненормальной работы нет.

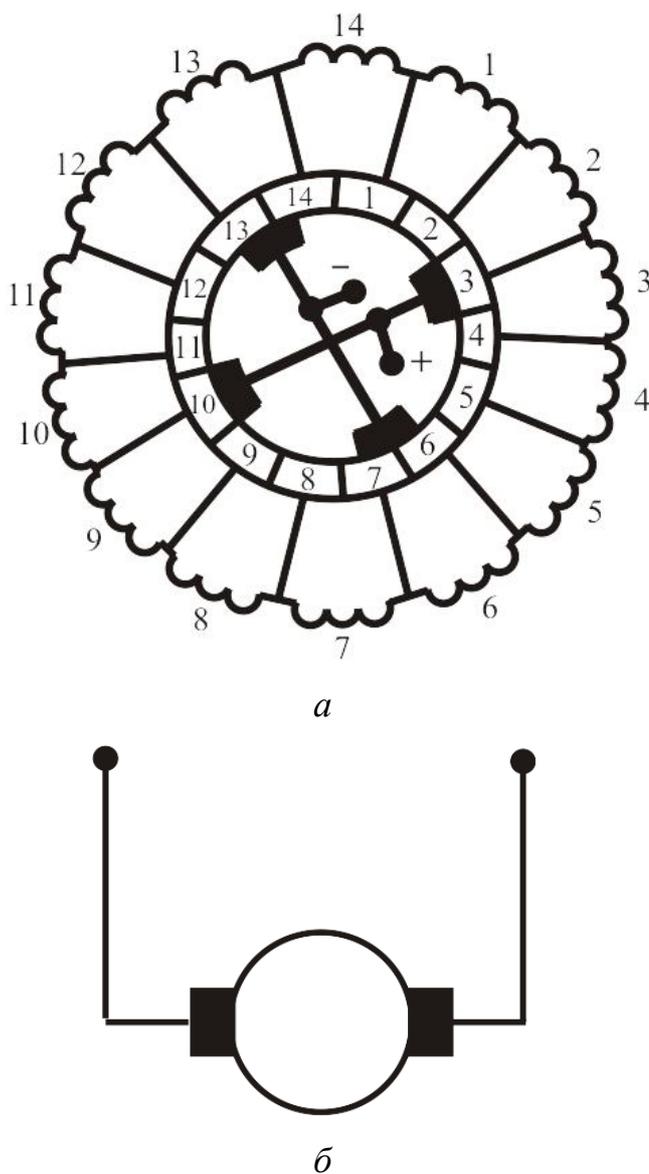


Рис. 3.22

## **Глава 4. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **4.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕМЫ**

1. Магнитная цепь и магнитные характеристики МПТ [1, с. 39-40; 2, с. 148, 149, 361; 3, с. 42, 43; 4, с. 188-190; 5, с. 34, 35; 7, ч. 1, с. 200, 201].

2. Общий порядок расчета магнитной цепи [1, с. 40-41; 2, с. 150-152, 362; 3, с. 43-45, 58-61; 5, с. 36, 37; 6, с. 36, 37; 7, ч. 1, с. 191, 192].

3. Определение магнитного напряжения воздушного зазора и зубцового слоя МПТ [1, с. 41-48; 2, с. 363; 3, с. 46-55; 4, с. 190-200; 5, с. 42-53; 7, ч. 1, с. 192-198].

### **4.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ**

В результате изучения темы студенты должны

**ПОМНИТЬ:**

– основные участки магнитной цепи МПТ, общий порядок расчета магнитной цепи МПТ;

**ОБЪЯСНИТЬ:**

– закон полного тока, процесс насыщения магнитной цепи МПТ;

**УМЕТЬ:**

– рассчитывать МДС магнитной цепи машины, определять коэффициент насыщения магнитной цепи по кривой намагничивания.

Вы также должны суметь ответить на следующие вопросы:

1. Как учитывается зубчатость якоря при определении магнитного напряжения воздушного зазора?

2. Какими упрощенными методами можно определить магнитное напряжение зубцового слоя?

3. Как учитывается магнитная проводимость паза при расчете магнитного напряжения зубцового слоя?

4. Как определяется коэффициент насыщения магнитной системы?

### **4.3. ЗАДАНИЯ ПО РАБОТЕ С КНИГОЙ**

Исходные данные задания определяются с помощью табл. 4.1 по номеру  $N_B$ , который студент узнает у преподавателя. При этом номе-

ра учебных пособий, указанных в табл. 4.1, соответствуют номерам источников, приведенных в списке рекомендованной литературы. Все задания выполняются в рабочей тетради студента и предъявляются преподавателю для проверки.

Таблица 4.1

Номер варианта $N_B$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Литература для изучения и сравнения	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 5	1, 2, 6	1, 2, 7	1, 3, 4	1, 3, 5	1, 3, 6	1, 3, 7
Номер варианта $N_B$	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Литература для изучения и сравнения	1, 4, 5	1, 4, 6	1, 4, 7	1, 5, 6	1, 5, 7	1, 6, 7	2, 3, 4	2, 3, 5	2, 3, 6
Номер варианта $N_B$	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Литература для изучения и сравнения	2, 3, 7	2, 4, 5	2, 4, 6	2, 4, 7	2, 5, 6	2, 5, 7	2, 6, 7	3, 4, 5	3, 4, 6
Номер варианта $N_B$	28	29	30	31	32	33	34	35	
Литература для изучения и сравнения	3, 4, 7	3, 5, 6	3, 5, 7	3, 6, 7	4, 5, 6	4, 5, 7	4, 6, 7	5, 6, 7	

1. Студенты, получившие варианты задания с 1 по 35, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для первого вопроса главы 3 и второго вопроса главы 4, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для второго вопроса главы 3 и первого вопроса главы 4. Студенты, получившие варианты задания с 36 по 70, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для второго вопроса главы 3 и первого вопроса главы 4, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для первого вопроса главы 3 и второго вопроса главы 4. При этом номеру варианта  $N_B = 36$  соответствует  $N_B = 1$ ,  $N_B = 37 - N_B = 2$  и т. д.

2. Необходимо изложить в рабочей тетради основные мысли текста из книг, относящихся к вашему варианту (по образцу табл. 4.2).

Таблица 4.2

Книга (библиографические данные)		К какому времени проработать	Оценка прочитанного
Страницы	Мысли, темы, возникшие идеи и т.д.		

#### 4.4. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

В результате изучения главы 4 нужно научиться решать следующую типовую задачу.

**Задача 4.1.** Магнитная цепь МПТ [1, с. 39-41; 2, с. 361-363; 3, с. 42-55, 58-61; 4, с. 188-200; 5, с. 34-53; 7, ч. 1, с. 191-201].

Сформулировать цель, объяснить, какой метод и порядок расчета магнитной цепи МПТ применяется.

Магнитная цепь машины постоянного тока – это путь, по которому замыкаются магнитные силовые линии основного магнитного поля. Основной магнитный поток  $\Phi_0$  – это поток, который сцепляется одновременно с обмоткой возбуждения и с проводниками обмотки якоря.

Магнитный поток, сцепляющийся только с обмоткой возбуждения, называется потоком рассеяния  $\Phi_\sigma$ .

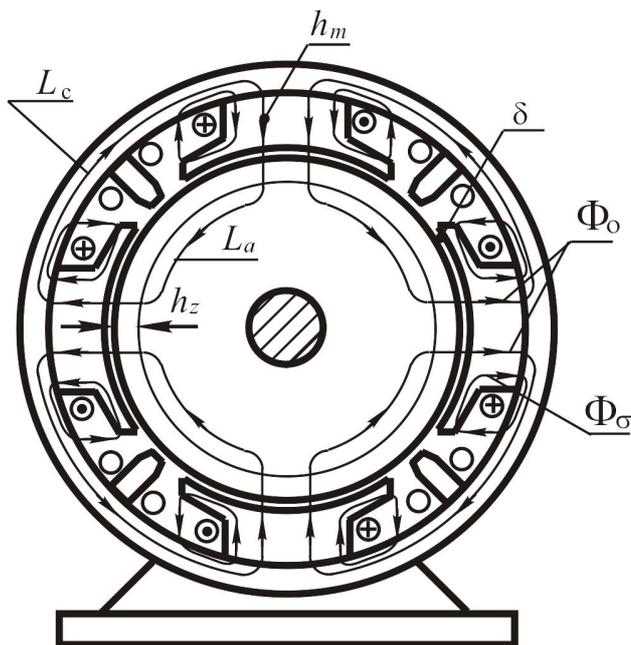


Рис. 4.1

Рассмотрим режим холостого хода МПТ. В этом случае на обмотку возбуждения подается напряжение и, следовательно, по обмотке протекает ток. Обмотка якоря разомкнута, и ток в ней равен нулю. Формально это записывается так:

$$U_f \rightarrow I_f; I_f \neq 0; I_a = 0,$$

где  $U_f$  – напряжение на обмотке возбуждения;

$I_f$  – ток обмотки возбуждения.

Магнитодвижущая сила (МДС) или намагничивающая сила (НС) обмотки возбуждения определяется по формуле  $F_f = I_f \cdot w_f$ , где  $w_f$  – число витков обмотки возбуждения.

Эскиз магнитной цепи четырехполюсной МПТ представлен на рис. 4.1.

Проанализируем картину поля. Магнитный поток полюса

$$\Phi_m = \Phi_0 + \Phi_\sigma; \Phi_m = \Phi_0 \cdot \left(1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_0}\right) = K_\sigma \cdot \Phi_0,$$

где  $K_\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_0}$  – коэффициент рассеивания главных полюсов.

Магнитная характеристика материала определяется функцией  $B = f(H)$  или  $B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H$ . Эту характеристику для стали берут из справочников. Цель расчета магнитной цепи – определение МДС полюсной катушки, необходимой для создания магнитного потока требуемой величины, который обеспечивает наведение в обмотке якоря определенной ЭДС. Для расчета используется закон полного тока. Этот закон устанавливает количественную связь между током обмотки возбуждения и созданным им магнитным потоком:

$$\oint H \cdot dl = \sum_1^n H_k l_k = 2 \cdot F_f,$$

где  $F_f$  – намагничивающая сила обмотки возбуждения одного полюса;

$H_k$  – напряженность магнитного поля на  $k$ -ом участке магнитной цепи;

$l_k$  – длина  $k$ -го участка магнитной цепи.

В качестве контура магнитной цепи используется путь по средней силовой линии.

При практических расчетах интегрирование заменяется суммированием, для чего магнитную цепь разбивают на ряд участков, в пределах которых материал (физические свойства материала и геометрические размеры магнитопровода) остается постоянным.

Участками магнитной цепи МПТ (рис. 4.1) являются: воздушный зазор ( $\delta = L_\delta$  – длина силовой линии воздушного зазора); сердечник полюса ( $h_m$  – длина силовой линии сердечника полюса); станина ( $L_c$  – длина силовой линии в станине); зубцы ( $L_z (h_z)$  – длина силовой линии в зубцах якоря); спинка якоря ( $L_a$  – длина силовой линии в спинке якоря).

МДС обмотки возбуждения

$$F_f = F_\delta + F_m + F_c + F_a + F_z$$

$$\text{или } F_f = 2H_\delta \cdot L_\delta + 2H_m \cdot h_m + H_c \cdot L_c + H_a \cdot L_a + 2H_z \cdot h_z.$$

Расчет магнитной цепи сводится к определению напряженности магнитного поля на выделенных участках магнитной цепи.

Рассмотрим последовательность расчета.

По исходным данным проектируемой машины ориентировочно определяем величину основного магнитного потока  $\Phi_m$ . Для этого определяется поперечное сечение полюса, по кривой намагничивания материала полюса выбирается индукция магнитного поля полюса, а затем полученные величины перемножаются. Для эффективного использования магнитного материала и уменьшения габаритов машины рекомендуется индукцию выбирать таким образом, чтобы рабочая точка находилась на перегибе кривой намагничивания.

Магнитную цепь разбиваем на участки. Определяем магнитный поток участка магнитной цепи (на примере потока  $\Phi_m$ ):

$$\Phi_m = \Phi_0 + \Phi_\sigma = \Phi_0 \left(1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_0}\right) = K_\sigma \Phi_0,$$

где  $K_\sigma = 1,1 \div 1,5$ .

Далее определяем магнитную индукцию участка магнитопровода по потоку и геометрическим размерам:

$$B_{уч} = \frac{\Phi_{уч}}{S_{уч}},$$

где  $S_{уч}$  – площадь сечения участка.

Напряженность магнитного поля на участках магнитопровода определяем по кривым или таблицам намагничивания для конкретной стали. Вычисляем падение магнитного напряжения участков магнитопровода на один полюс:

$$U_{муч} = H_{уч} l_{уч},$$

где  $l_{уч}$  – длина магнитной силовой линии на участке;

$U_{муч}$  – падение магнитного напряжения на участке.

Последовательность определения намагничивающей силы обмотки возбуждения можно изобразить следующей схемой:

$$\Phi_0 \rightarrow \Phi_{\text{уч}} \rightarrow B_{\text{уч}} \rightarrow H_{\text{уч}} \rightarrow U_{\text{муч}} \rightarrow \sum U_{\text{муч}} = F_f$$

Аналогичные расчеты проводят для нескольких величин  $\Phi_0$ :  $0,25 \Phi_0$ ;  $0,5 \Phi_0$ ;  $0,75 \Phi_0$ ;  $1 \Phi_0$ ;  $(1,1 \div 1,5) \Phi_0$ . По результатам расчетов строим магнитную характеристику машины.

Для оценки степени использования ферромагнитного материала рассчитывается коэффициент насыщения магнитной цепи (рис. 4.2) для номинального магнитного потока. На рис. 4.2 представлена вебер-амперная характеристика магнитной цепи МПТ: 1 – вебер-амперная характеристика магнитной цепи МПТ при отсутствии явления насыщения стали, 2 – реальная вебер-амперная характеристика магнитопровода МПТ.

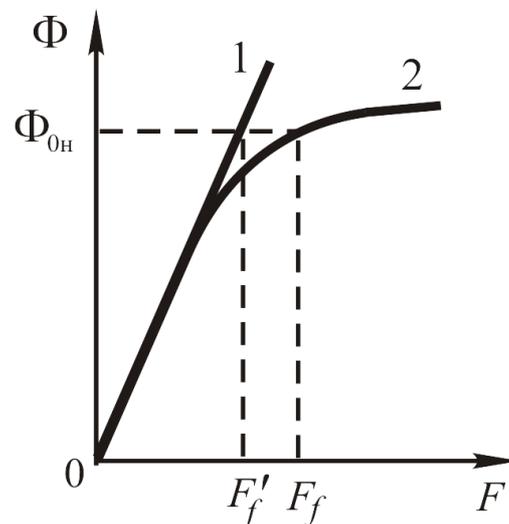


Рис. 4.2

Коэффициент насыщения

$$K_S = \frac{F_f}{F'_f},$$

где  $F_f = F'_f + F_{\text{ст}} = F'_f \left(1 + \frac{F_{\text{ст}}}{F'_f}\right) = F'_f K_S$  – МДС обмотки возбуждения.

Обычно в МПТ  $K_S = 1,3 \div 1,4$ .

#### 4.5. ТЕЗАУРУС ПОНЯТИЙ ТЕМЫ

**Закон полного тока** устанавливает связь между интегралом напряженности магнитного поля по замкнутому контуру и эффективным током, создавшим это магнитное поле и пересекающим поверхность, ограниченную этим контуром.

Для любого замкнутого контура намагничивающая сила, равная интегралу напряженности по этому контуру, равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром. Для рис. 4.3 закон полного тока может быть записан в следующем виде:  $\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I$ .

$$F = I_2 + I_3 + I_4,$$

где  $F$  – магнитодвижущая (намагничивающая) сила;  $I$  – сила тока.

Для катушки с током  $I$  и числом витков  $w$ :  $F = I \cdot w$ .

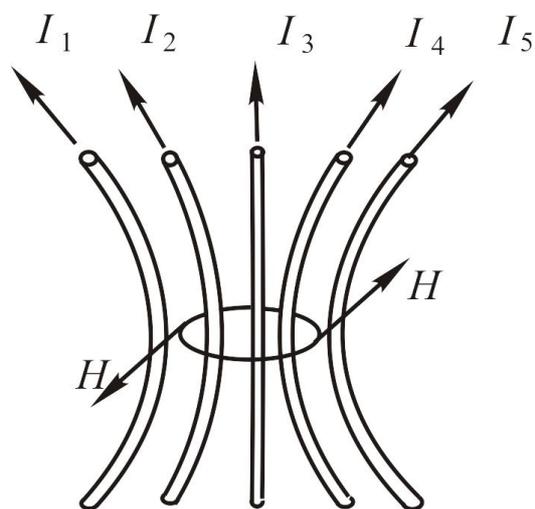


Рис. 4.3

### Магнитная проводимость

участка магнитопровода – величина, равная отношению **магнитного потока** поперечного сечения участка к падению магнитного напряжения, равного произведению напряженности магнитного поля на длину участка. Условное обозначение –  $G_M$ , единица измерения – Вб/А:  $G_M = 1/R_M$ , где  $R_M$  – магнитное сопротивление.

**Магнитное сопротивление** характеризует способность вещества препятствовать прохождению через него магнитного потока. Магнитное сопротивление используется для характеристики участков магнитопровода и является эквивалентом электрического активного сопротивления проводников электрического тока.

Условное обозначение –  $R_M$ ; единица измерения – 1/Гн.

$$R_M = \frac{l}{\mu \mu_0 \cdot s},$$

где  $l$ ,  $s$  – соответственно средняя длина и площадь поперечного сечения участка магнитной цепи;  $\mu$  – относительная **магнитная проницаемость** материала.

**Магнитные силовые линии** – линии, используемые для графического представления магнитного поля. Для сравнительного анализа интенсивности магнитных полей выбирают плотность линий, пропорциональную индукции поля. Для обозначения направления индукции или напряженности магнитного поля используют стрелки на силовых линиях. В отличие от силовых линий электрического поля, силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. Их направление

определяется с учетом того, что силовые линии внешнего магнитного поля постоянного магнита выходят из северного полюса и входят в южный полюс. Внутри **постоянного магнита** силовые линии направлены от южного полюса к северному полюсу. Направление силовых линий магнитного поля катушки определяется по **правилу правоходового винта**.

**Магнитный поток** – поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность. Условное обозначение –  $\Phi$ , единица измерения – вебер (Вб).

**Магнитодвижущая сила (МДС)** – величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока и равная циркуляции напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура. Условное обозначение –  $F$ , единица измерения – ампер (А).

$F = I \cdot w$ , где  $I$  – сила тока катушки;  $w$  – число витков катушки.

**Напряженность магнитного поля** – векторная величина, характеризующая **магнитное поле** токов и не зависящая от свойств среды. Условное обозначение –  $H$ , единица измерения – А/м.

$H = I \cdot w / l$ , где  $I$  – ток;  $w$  – число витков катушки с током;  $l$  – длина силовой линии.

**Ферромагнитное вещество (ФВ)** – вещество, обладающее способностью концентрировать и усиливать магнитное поле.

Обычно ФВ, к которым относятся такие материалы, как сталь, никель, кобальт, обладают высокой **магнитной проницаемостью**. Ввиду того, что численное значение магнитной проницаемости зависит от интенсивности внешнего магнитного поля, магнитные свойства ФВ принято характеризовать кривой намагничивания, т.е. зависимостью индукции от напряженности магнитного поля в данной точке. По кривой намагничивания можно определить магнитную проницаемость конкретного ФВ при определенной напряженности магнитного поля или индукции (рис. 4.4). На рис. 4.4 приведены кривые намагничивания ферромагнитных материалов: 1 – конструкционной стали; 2 – электротехнической стали; 3 – чугуна.

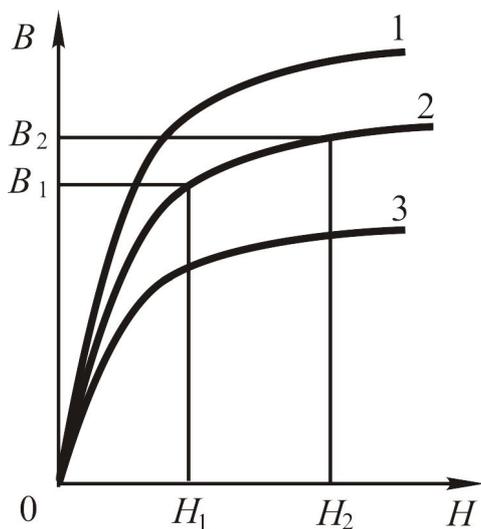


Рис. 4.4

Эффект усиления внешнего магнитного поля в ФВ обусловлен тем, что элементарные области спонтанного намагничивания (домены), из которых состоит ФВ, ориентируются относительно силовых линий внешнего поля. Это приводит в свою очередь к увеличению магнитной индукции результирующего магнитного поля. При определенных значениях индукции происходит насыщение ФВ, которое характеризуется слабой зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

#### 4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

Используя как пример задачу 4.1, рассчитать магнитную цепь и коэффициент насыщения машины постоянного тока для своего варианта. При расчете магнитной цепи машин считать, что материал сердечников якоря и полюсов – сталь марки 2312, станина изготовлена из литой стали Ст 3; коэффициент заполнения сталью магнитопроводов якоря и полюсов – 0,9; ширина радиального вентиляционного канала при  $K_{B2}$  1, 3, 5 – 0,01 м. По полученным данным построить кривую зависимости  $E = f(F)$ .

Исходные данные задачи определяются с помощью табл. 4.3, 4.4 по номеру  $N_B$ , который студент узнает у преподавателя. При этом номер варианта рассчитывается по формуле  $N_B = K_{B1} + (K_{B2} \cdot 10)$ .

То есть если задан, например, 57–ой вариант, то  $K_{B1} = 7$ , а  $K_{B2} = 5$ .

Таблица 4.3

	Генератор					Двигатель				
Коэффициент расчета номера варианта $K_{B1}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительное значение $\Phi_\delta$	0,25	0,5	0,75	1	1,25	0,25	0,5	0,75	1	1,25

Таблица 4.4

Величины	Варианты $K_{B2}$					
	0	1	2	3	4	5
Номинальная мощность, кВт	13,3	4540	23	500	14	300
Напряжение, В	230	750	230	460	220	230
Сопротивление цепи якоря, Ом	0,465	0,003	0,197	0,0094	0,205	0,0064
Частота вращения, об/мин	1460	50	970	375	1000	140
Число полюсов	4	24	4	8	4	8
Наружный/внутренний диаметр якоря, мм	245	3600	280	990	245	1400
	60	---	70	---	50	---
Длина якоря, мм	80	1310	140	340	125	320
Число проводников ОЯ	834	2232	500	460	558	960
Число параллельных ветвей $2a$	2	24	2	4	2	8
Коэффициент полюсной дуги	0,65	0,7	0,7	0,65	0,65	0,7
Число пазов	35	372	48	115	31	120
Ширина паза, мм	8,5	13,8	10,6	11	9,6	16
Высота паза и зубца, мм	36,2	53,5	36,2	40	30	50
Воздушный зазор, мм	1,5	8	3	5	2,2	10
Осевая длина полюса, мм	80	1320	---	340	125	310
Ширина полюса, мм	80	260	---	200	80	240
Сечение полюса, мм <sup>2</sup>	---	---	12500	---	---	---
Высота полюса, мм	70	280	110	175	90	300
Сечение станины, мм <sup>2</sup>	4150	188500	7500	41200	5300	73000
Высота станины, мм	260	135	50	75	25	120
Коэффициент рассеяния	1,25	1,15	1,25	1,2	1,25	1,15
Число вентиляционных каналов	---	22	---	4	---	3

Величины	Варианты $K_{B2}$					
	6	7	8	9	10	11
Номинальная мощность, кВт	18	28	41	20,5	34	27
Напряжение, В	230	115	230	230	460	230
Сопротивление цепи якоря, Ом	0,13	0,02	0,05	0,05	0,1	0,25
Частота вращения, об/мин	1460	1470	1470	1410	1700	2100
Число полюсов	4	4	4	4	4	4
Наружный диаметр якоря, мм	245	295	295	295	340	245
Внутренний диаметр якоря, мм	75	85	85	85	95	75
Длина якоря, мм	120	100	140	140	140	80
Число проводников ОЯ	484	246	369	369	492	524
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2
Коэффициент полюсной дуги	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Число пазов	35	31	31	31	41	33
Ширина паза, мм	7,3	11,5	11	11	9,2	8,4
Высота паза и зубца, мм	36	36	36	36	41	36
Воздушный зазор, мм	2	2	2	2	2,5	2
Осевая длина полюса, мм	120	100	140	140	140	80
Ширина полюса, мм	80	100	100	100	120	80
Коэффициент рассеяния	1,19	1,18	1,18	1,18	1,17	1,18
Диаметр станины внутренний, мм	440	530	530	530	590	440
Диаметр станины наружный, мм	495	595	595	595	675	495
Длина станины, мм	240	250	290	290	300	200

## **Глава 5. ОБМОТКИ ЯКОРЯ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **5.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕМЫ**

1. Основные понятия [1, с. 53-58; 2, с. 342, 345; 3, с. 62, 63, 80-86; 4, с. 466, 467, 480, 481; 5, с. 161-163; 6, с. 15-21; 7, ч. 2, с. 208].

2. Шаги обмотки [1, с. 58-61; 3, с. 86-89; 4, с. 468, 469; 5, с. 164; 6, с. 22-24; 7, ч. 2, с. 209].

3. Простая петлевая обмотка якоря (ОЯ) МПТ [1, с. 63-71; 2, с. 343, 344; 3, с. 89-99; 4, с. 469-472; 5, с. 164-168; 6, с. 22, 23; 7, ч. 2, с. 209-212].

4. Сложная петлевая обмотка [1, с. 72-78; 2, с. 346, 347; 3, с. 103-107; 4, с. 472-474; 5, с. 170-173; 6, с. 24; 7, ч. 2, с. 214, 215].

5. Простая волновая обмотка якоря МПТ [1, с. 79-84; 2, с. 347, 348; 3, с. 99-103; 4, с. 474-476; 5, с. 168-170; 6, с. 24, 25; 7, ч. 2, с. 212, 213].

6. Сложная волновая обмотка [1, с. 84-87; 2, с. 349; 3, с. 107-109; 4, с. 477; 5, с. 173-175; 6, с. 25, 26; 7, ч. 2, с. 214, 215].

7. Уравнительные соединения и комбинированная обмотка якоря [1, с. 87, 88; 2, с. 350-355; 3, с. 109-123; 4, с. 477-480; 5, с. 175-178; 6, с. 27-29, 31-34].

Каждый вопрос темы изучается по рекомендуемой литературе и с учетом методических указаний. По мере изучения темы по данному пособию или учебной литературе необходимо составить в рабочей тетради список условных обозначений величин.

### **5.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ**

В результате изучения темы студенты должны

**ПОМНИТЬ:**

– обозначение количества секций обмотки якоря и числа витков в секции; определения первого частичного шага по якорю, второго частичного шага по якорю, результирующего шага обмотки по якорю; определение параллельной ветви ОЯ; условия симметрии ОЯ; определение уравнителей первого рода;

## ОБЪЯСНЯТЬ:

– понятие шага ОЯ; понятие элементарного паза; понятие двухслойной обмотки барабанного якоря; отличие правоходовой и левоходовой петлевой ОЯ; причины возникновения уравнивающих токов; отличие сложной и простой петлевой ОЯ; отличие правоходовой и левоходовой волновой ОЯ; отличие сложной и простой волновой ОЯ; отличие равносекционной и ступенчатой ОЯ;

## УМЕТЬ:

– рассчитывать шаги ОЯ; выполнять развернутую схему простой петлевой обмотки; выполнять развернутую схему простой волновой обмотки.

Вы также должны суметь ответить на следующие вопросы:

1. Как связано число проводников с числом секций и коллекторных пластин?
2. В чем отличие между действительным и элементарным пазом?
3. Зачем в одном слое паза располагают рядом несколько секций?
4. Как находится число витков якоря по числу коллекторных пластин и по числу витков в секции?
5. Напишите формулу, связывающую шаг по коллектору с первым и вторым частичными шагами простой петлевой обмотки.
6. Сколько параллельных ветвей имеет простая петлевая обмотка якоря четырехполюсной машины?
7. В чем отличие между петлевыми и волновыми обмотками?
8. Зачем нужны уравнивающие соединения? Где они располагаются?
9. Чему равна ширина секции обмотки якоря?
10. Напишите формулу для простой волновой обмотки, связывающую шаг по коллектору с первым и вторым частичными шагами.
11. Сколько параллельных ветвей имеет простая волновая обмотка? Нужно ли в ней делать уравнивающие соединения?
12. Для чего делаются сложные (многоходовые) обмотки?
13. Сколько параллельных ветвей имеют многоходовые петлевые и волновые обмотки?
14. Каковы условия симметрии обмоток?
15. Как конструктивно выполняются уравнивающие соединения второго и третьего родов?

### 5.3. ЗАДАНИЯ ПО РАБОТЕ С КНИГОЙ

Исходные данные задания определяются с помощью табл. 4.1 по номеру  $N_B$  (см. глава 4).

1. Студенты, получившие варианты задания с 1 по 35, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для первого вопроса главы 5 и третьего вопроса главы 5, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для второго вопроса главы 5 и пятого вопроса главы 5.

Студенты, получившие варианты задания с 36 по 70, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для второго вопроса главы 5 и пятого вопроса главы 5, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для первого вопроса главы 5 и третьего вопроса главы 5.

2. Необходимо изложить в рабочей тетради основные мысли текста из книг, относящихся к вашему варианту (по образцу табл. 4.2).

### 5.4. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

В результате изучения главы 5 нужно научиться решать следующие типовые задачи.

**Задача 5.1.** Тема задачи – ЭДС, электромагнитный момент, простая волновая обмотка МПТ [1, с. 58-61, 79-84, 90-93; 2, с. 343, 344, 355-359; 3, с. 99-103, 123; 4, с. 474-476, 482-486; 5, с. 168-170, 178-181; 7, ч. 2, с. 203-208, 212, 213].

1. Привести формулы для ЭДС якоря и электромагнитного момента МПТ. Объяснить, как они выведены.

2. Якорь четырехполюсной машины постоянного тока имеет простую волновую обмотку с числом эффективных проводов  $N = 396$  и числом витков в секции  $w_C = 2$ , ток якоря  $I_a = 100\text{А}$ . Рассчитать шаги обмотки и ток параллельной ветви.

3. Выполнить развернутую схему простой левоходовой волновой обмотки с числом полюсов  $2p = 4$  и числом реальных пазов  $Z = 15$ . Число витков в секции  $w_C = 2$  и число элементарных пазов в реальном пазу  $u_{\pi} = 1$ .

Выполним первое задание (первый пункт условия задачи).

При вращении якоря машины постоянного тока, магнитный поток которой не равен нулю, в его обмотке наводится электродвижущая сила, величина и полярность которой зависит от величины магнитного потока, от частоты вращения якоря и от конструктивных особенностей машины.

Магнитную цепь электрической машины проектируют с таким расчетом, чтобы векторы магнитной индукции были практически перпендикулярны поверхности якоря. Распределение же индукции по воздушному зазору, как указывалось ранее, неравномерно.

Электродвижущая сила одного проводника  $e$  длиной  $l$ , перемещающегося в магнитном поле перпендикулярно силовым линиям с линейной скоростью  $v$ , определяется с помощью уравнения

$$e = Blv,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля в зоне расположения проводника.

Если в пазах машины уложено  $N$  проводников обмотки якоря, которые образуют  $2a$  параллельных ветвей, то суммарная ЭДС обмотки определится следующим соотношением:

$$E = \sum_{K=1}^N B_n \cdot l \cdot v \cdot \frac{1}{2 \cdot a};$$

здесь  $a$  – число пар параллельных ветвей.

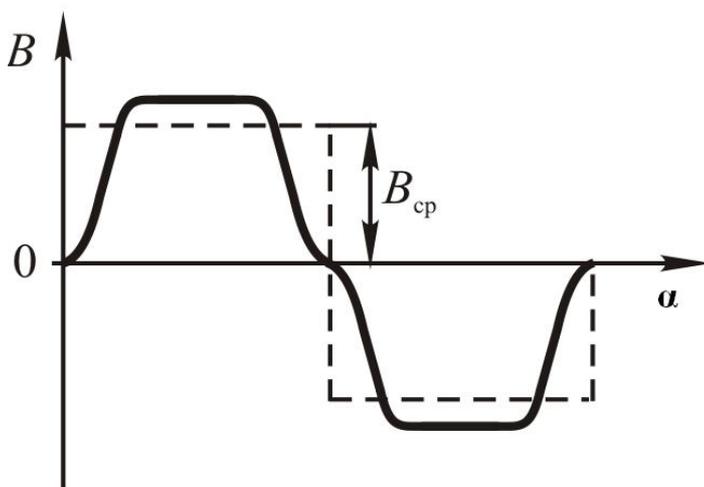


Рис. 5.1

Частоту вращения якоря принято выражать в оборотах в минуту. Если якорь имеет радиус  $R$  и вращается с частотой  $n$  об/мин, то линейную скорость перемещения проводников можно получить с помощью формулы

$$v = \frac{n}{60} \pi \cdot D \text{ м/с.}$$

Реальные значения индукции зазора заменим ее средним значением под каждым полюсом (рис. 5.1), тогда ЭДС каждой ветви обмотки якоря будет равной

$$E = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \frac{n}{60} \pi \cdot D.$$

Полученное уравнение умножим и разделим на количество полюсов машины  $2 \cdot p$ , тогда

$$E = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot \frac{1}{60} \cdot 2p \cdot n \cdot B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p}.$$

В этом уравнении  $\frac{\pi \cdot D}{2p}$  является длиной средней линии воздушного зазора, приходящейся на один полюс,  $l$  – длина проводников, находящихся в магнитном поле, то есть практически длина паза якоря или, что то же самое, длина магнитопровода якоря. Величина  $l \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p}$  является площадью поверхности якоря, приходящейся на один полюс машины. Произведение этой площади на среднее значение индукции

$B_{\text{ср}}$  равно магнитному потоку машины:  $B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} = \Phi.$

ЭДС машины в этом случае  $E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{2 \cdot a \cdot 60} \cdot n \cdot \Phi = \frac{p}{60a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi.$

В полученной формуле  $\frac{2 \cdot p \cdot N}{2 \cdot a \cdot 60}$  – величина постоянная для данной машины и зависит только от ее конструкции.

Обозначив  $\frac{2 \cdot p \cdot N}{2 \cdot a \cdot 60} = C_e$ , получим окончательную формулу для нахождения ЭДС машины:

$$E = C_e \cdot n \cdot \Phi,$$

где  $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$  – конструктивная постоянная машины при определении ее ЭДС;

$n$  – частота вращения якоря;

$\Phi$  – магнитный поток машины, который зависит в общем случае от намагничивающей силы обмотки возбуждения и, следовательно, от тока обмотки возбуждения  $I_f$ .

Полученная формула дает хороший результат, то есть может быть использована для построения и объяснения поведения характеристик машин постоянного тока. Реальное значение электродвижущих сил якорных обмоток несколько ниже расчетных. Это объясняется следующим явлением. ЭДС отдельного проводника, как уже говорилось ранее, пропорциональна индукции магнитного поля в зоне его расположения в каждый момент времени:  $e = B \cdot l \cdot v$ .

При вращении якоря со скоростью  $n$  эта ЭДС изменяется по периодическому закону, повторяющему по форме закон распределения индукции в зазоре.

Как известно из курса электротехники, такая периодическая не-синусоидальная функция может быть представлена в виде ряда Фурье для любого  $k$ -го витка.

Секции обмотки якоря расположены в различных пазах, то есть смещены в пространстве на определенный пространственный угол. Это приводит к тому, что гармонические составляющие ЭДС каждой секции будут сдвинуты по фазе. В этом случае амплитуда суммарной ЭДС ветви обмотки якоря, представляющая собой сумму мгновенных значений ЭДС отдельных витков, будет равна не сумме амплитуд соответствующих гармоник, а их векторной сумме с учетом разности фаз. Для более наглядного объяснения обычно используют векторно-топографическую диаграмму первых гармоник ЭДС якорной обмотки (рис. 5.2).

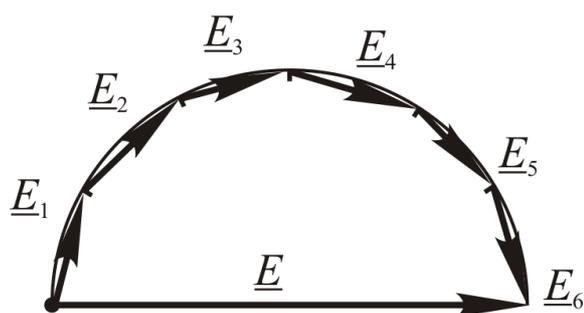


Рис. 5.2

Здесь  $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3, \underline{E}_4, \underline{E}_5, \underline{E}_6$  – векторы ЭДС секций одной из параллельных ветвей двухполюсной машины, имеющей на поверхности якоря 12 пазов для укладки обмоток. В такой машине секции якорной обмотки сдвинуты в пространстве на 30

пространственных градусов. Как следует из приведенного примера, результирующая ЭДС  $E$  всегда меньше суммы действующих значений ЭДС секций. Векторная сумма других гармонических составляющих ЭДС секций дает похожий результат.

Таким образом, ЭДС якорной обмотки реальной машины всегда меньше расчетного значения. Это уменьшение учитывается путем введения дополнительного коэффициента в постоянную  $C_e$ . Значение этого коэффициента уточняется экспериментально.

Смещение щеток с физической нейтрали, так же, как и укорочение шага обмотки, приводит к уменьшению ЭДС якоря, что объясняется включением в параллельные ветви секций с разным направлением ЭДС, индуцированных в них.

Выведем формулу электромагнитного момента якоря.

Машины постоянного тока являются машинами обратимыми. Они могут работать как в режиме генератора, преобразующего механическую энергию в электрическую, так и в режиме двигателя, преобразующего электрическую энергию в механическую. И в том, и в другом случае на валу машины имеется механический момент. Если пренебречь механическими потерями в машине, то величина этого момента складывается из механических моментов, действующих на проводники якорной обмотки. Сила, действующая на проводник с током  $I'$  длиной  $l$ , находящийся в магнитном поле с индукцией  $B$ , определяется из формулы:  $F = B \cdot I' \cdot l$ .

Механический момент, создаваемый одним проводником,  $M' = F \cdot R$ , где  $R$  – радиус якоря.

Если в пазах якоря уложено  $N$  проводников, то, используя среднее значение индукции  $B_{cp}$ , получим:

$$M'' = N \cdot M' = N \cdot B_{cp} \cdot I' \cdot l \cdot R.$$

Если общий ток якоря  $I$ , а обмотка имеет  $2a$  параллельных ветвей, то ток одного проводника обмотки в  $2a$  раз меньше общего тока,

то есть  $I' = \frac{I}{2 \cdot a}$ , тогда  $M = \frac{N \cdot l \cdot R}{2 \cdot a} \cdot B_{cp} \cdot I$ .

Введя в формулу величину диаметра якоря  $R = D/2$  и умножив числитель и знаменатель коэффициента на  $\pi$ , получим:

$$M = \frac{N \cdot l \cdot D \cdot \pi}{4 \cdot a \cdot \pi} \cdot B_{\text{ср}} \cdot I.$$

Умножим и разделим полученное выражение на количество полюсов машины  $2 \cdot p$ , тогда

$$M = \frac{l \cdot 2 \cdot p}{4 \cdot a \cdot \pi} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \cdot B_{\text{ср}} \cdot I = \frac{p \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \cdot B_{\text{ср}} \cdot I.$$

Величина  $\pi \cdot D \cdot l$  является длиной окружности якоря, умноженной на длину внешней поверхности якоря, то есть площадью поверхности якоря. Эта площадь, разделенная на количество полюсов, определит площадь якоря, находящуюся над одним полюсом.

Но произведение среднего значения индукции на эту площадь равно магнитному потоку машины, или

$$\frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \cdot B_{\text{ср}} = \Phi.$$

Подставляя это значение в формулу момента, получаем:

$$M = \frac{p}{2 \pi \cdot a} \cdot N \cdot \Phi \cdot I.$$

Обозначив  $\frac{p \cdot N}{2 \pi \cdot a}$  постоянной  $C_1$ , то есть постоянной, зависящей лишь от конструкции машины, получим:

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I.$$

Таким образом, механический момент на валу машины постоянного тока зависит от конструкции машины и пропорционален магнитному потоку и току якоря.

Перейдем ко второму пункту условия задачи.

Число коллекторных пластин  $K = \frac{N}{2w_c} = \frac{396}{4} = 99.$

Число секций равно числу элементарных пазов и числу коллекторных пластин:  $S = Z_{\text{э}} = K = 99$ .

Примем, что число рядом лежащих в пазу секционных сторон (число элементарных пазов в одном реальном пазу)  $u_{\text{п}} = 3$ .

$$\text{Тогда число реальных пазов } Z = \frac{K}{u_{\text{п}}} = \frac{99}{3} = 33.$$

Простая волновая обмотка выполняется в МПТ при числе полюсов  $2p \geq 4$  и получается последовательным соединением секций, активные стороны которых размещены в пазах, отстоящих друг от друга на расстояние  $\approx 2\tau$  (двойное полюсное деление), т. е.  $y = y_k \approx 2\tau$ .

Для простой волновой обмотки  $y = y_k = (K \pm 1)/p$ , где отрицательный знак применяется в случае левоходовой неперекрещивающейся, а положительный – в случае правоходовой перекрещивающейся. Предпочтение отдается первой. Левоходовая обмотка получается в том случае, если после укладки первых  $p$  секций и обхода по якорю приходят к коллекторной пластине, расположенной слева от исходной.

Из условия задачи известно, что число полюсов  $2p = 4$ .

В то же время известно, что для простой волновой обмотки число параллельных ветвей  $2a = 2$ .

$$\text{Рассчитаем результирующий шаг: } y = \frac{K - 1}{p} = \frac{99 - 1}{2} = 49.$$

Первый частичный шаг по якорю  $y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \mp \xi$ . Рассчитаем его с

$$\text{укорочением: } y_1 = \frac{K}{2p} - \xi = \frac{99}{4} - \frac{3}{4} = 24.$$

Второй частичный шаг по якорю  $y_2 = y - y_1 = 49 - 24 = 25$ .

Шаг по коллектору  $y_k = y = y_1 + y_2 = 49$ .

Шаг по реальным пазам должен быть целым числом:

$$y_{\text{п}} = \frac{y_2}{u_{\text{п}}} = \text{ц.ч.}$$

$$\text{В нашем случае } y_{\text{п}} = \frac{y_2}{u_{\text{п}}} = \frac{24}{3} = 8.$$

Ток параллельной ветви обмотки якоря

$$i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{100}{2} = 50 \text{ А.}$$

Перед выполнением развернутой схемы обмотки (третий пункт условия задачи) определим ее шаги.

Число коллекторных пластин, секций и элементарных пазов  $K = S = Z_p = u_n \cdot Z = 1 \cdot 15 = 15$ .

Первый частичный (укороченный шаг)  $y_1 = \frac{Z_p}{2p} \pm \xi = \frac{15}{4} \pm \frac{3}{4} = 3$ .

Полюсное деление, измеренное в пазах якоря,  $\tau_n = \frac{Z}{2p} = \frac{15}{4} = 3,75 = 2,5 + 1,25$ . Здесь первое слагаемое равно ширине полюса в пазовых делениях.

Результирующий шаг и шаг по коллектору

$$y_k = y = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7.$$

Второй частичный шаг  $y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$ .

Порядок построения схемы. Так как  $y_1 = 3$ , то от верхнего первого паза переходим к  $1В + 3 = 4$ , т.е. к четвертому нижнему 4Н. Второй частичный шаг  $y_2 = 4$ , а поэтому от 4Н переходим к  $4 + 4 = 8$ , т.е. к 8В и т.д. Шаг по коллектору  $y_k = 7$ , поэтому, если присоединить 1В к первой коллекторной пластине, нижняя секционная сторона 4Н присоединится к  $1 + 7 = 8$  коллекторной пластине. К этой же пластине присоединится и начало 8В следующей секции.

Порядок соединения между собой секционных сторон обмотки и соединения секций с коллекторными пластинами приведен на рис. 5.3.

Развернутая схема обмотки представлена на рис. 5.4. На рисунке выделена коммутируемая секция.

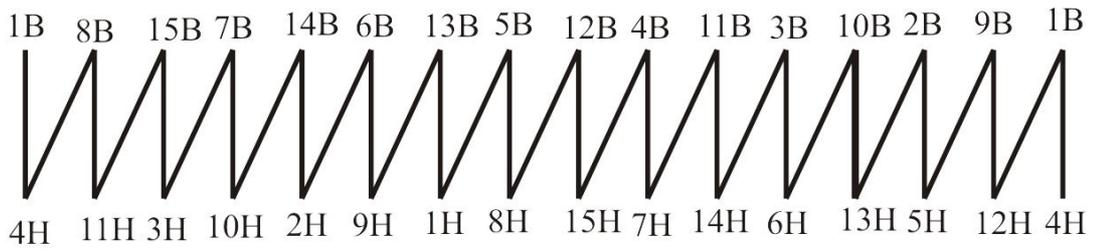


Рис. 5.3

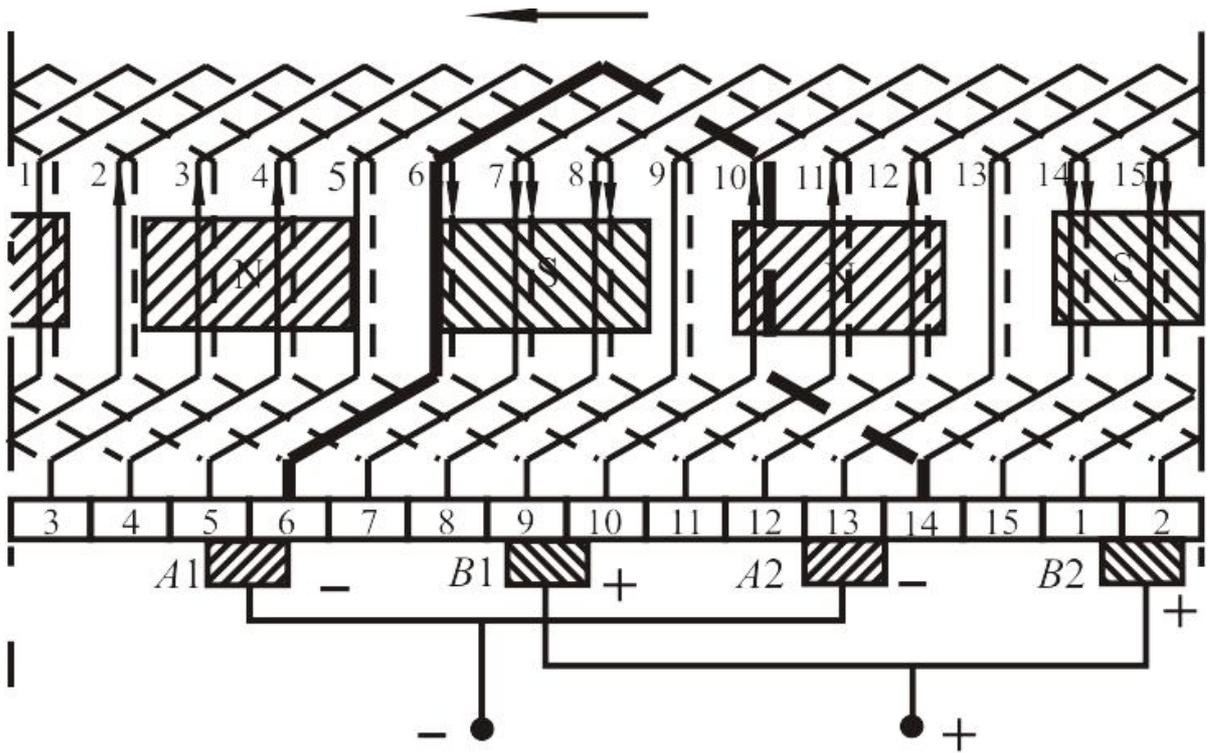


Рис. 5.4

**Задача 5.2.** Тема задачи – простая петлевая обмотка якоря МПТ, уравнивательные соединения.

Определить параметры простой петлевой обмотки МПТ. Число пазов якоря четырехполюсной машины постоянного тока  $Z = 42$ . Число рядов лежащих активных сторон секций в пазу  $u_{\text{п}} = 2$ .

Определить шаги обмотки и число параллельных ветвей. Какого рода уравнительными соединениями снабжается эта обмотка? [1, с. 68-70; 2, с. 343, 344, 347, 348, 350-355; 3, с. 89-103, 109-123; 4, с. 469-472, 474-480; 5, с. 164-170, 175-178; 6, с. 22-25, 27-29, 31-34; 7, ч. 2, с. 209-213].

Дано:  $u_{\pi} = 2$ ;  $2p = 4$ ;  $Z = 42$ .

Требуется определить  $y_1, y_2, y, y_k$ .

Решение.

Шаги обмотки рассчитываются по формулам, приведенным в третьем пункте предыдущей задачи.

Число элементарных пазов  $Z_0 = Z \cdot u_{\pi} = 42 \cdot 2 = 84$ .

Для простой петлевой обмотки результирующий шаг и шаг по коллектору  $y = y_k = \pm 1$  (в случае положительного знака в формуле обмотка правоходовая неперекрещивающаяся).

Первый частичный шаг  $y_1 = \frac{Z_0}{2p} \pm \xi = \frac{84}{4} \pm 0 = 21$ , т. е. обмотка с

полным шагом.

Второй частичный шаг  $y_2 = y - y_1 = 1 - 21 = -20$ .

Для любой простой петлевой обмотки справедливо отношение  $2a = 2p$ , где  $2a$  – число параллельных ветвей,  $2p$  – число пар полюсов. Таким образом, число параллельных ветвей равно  $2a = 4$ .

Обмотка якоря и электромеханический преобразователь в целом работают наиболее эффективно, если ЭДС и омическое сопротивление всех ветвей одинаковы. Т. е.  $E_a = e_a$  и  $I_a = 2a \cdot i_a$ , где  $i_a$  – ток параллельной ветви;  $I_a$  – ток якоря;  $E_a$  – ЭДС обмотки якоря.

Чтобы выполнить это условие, обмотка якоря должна удовлетворять условиям симметрии:  $\frac{S}{a} = \text{ц.ч.}$  и  $\frac{Z}{a} = \text{ц.ч.}$  В этом случае обмотка называется симметричной.

Однако даже при соблюдении условий симметрии выполнить ОЯ со строго одинаковыми значениями ЭДС и омическим сопротивлением отдельных ветвей практически нереально. В связи с этим в такой обмотке всегда имеют место уравнительные токи, вызванные неравенством ЭДС. Эти токи замыкаются внутри обмотки, проходя путь

через коллектор, щетки и соединительные провода между ними, что приводит к ухудшению работы скользящего контакта, которое особенно заметно при нагрузке машины. Чтобы уравнительные токи не проходили через коллектор и щетки, петлевые обмотки снабжаются так называемыми уравнительными соединениями первого рода. Уравнители – это проводники, соединяющие теоретически равнопотенциальные точки обмотки. Расстояние между ними определяется по следующей формуле:  $y_n \approx 2\tau_n$ .

Определим шаг и число уравнительных соединений нашей обмотки. Шаг уравнительных соединений  $y_n = K/a = 84/2 = 42$ .

Число точек, соединяемых одним уравнителем,  $n_n = a = 2$ .

Принимая во внимание то, что каждая вторая пластина коллектора соединяется уравнителем, находим число коллекторных пластин, соединяемых уравнительными соединениями:  $K_y = K/2 = 84/2 = 42$ .

Число уравнительных соединений  $n_y = K_y/n_n = 42/2 = 21$ .

Между собой соединяются следующие коллекторные пластины: 1-м уравнителем 1-43-1; 2-м уравнителем 3-45-3; 3-м уравнителем 5-47-5 и т. д.

**Задача 5.3.** Определить ЭДС простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины, если число эффективных проводов обмотки якоря  $N = 920$ , частота вращения якоря  $n = 1500$  об/мин, магнитный поток полюса  $\Phi_0 = 0,425 \cdot 10^{-2}$  Вб [1, с. 90, 91; 2, с. 357; 4, с. 483; 5, с. 179; 7, ч. 2, с. 206].

*Дано:*  $N = 920$ ;  $n = 1500$  об/мин;  $\Phi_0 = 0,425 \cdot 10^{-2}$  Вб;  $a = 1$ ;  $p = 2$ .

*Найти:*  $E_a$  – ?

*Решение.*

Запишем формулы, необходимые нам для расчета:

$$E_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi_0 \Omega; \quad \Omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

Для простой волновой обмотки:  $2a = 2 \Rightarrow a = 1$ .

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с};$$

$$E_a = \frac{2 \cdot 920}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \cdot 0,425 \cdot 10^{-2} \cdot 157 = 195,5 \text{ В}.$$

## 5.5. ТЕЗАУРУС ПОНЯТИЙ ТЕМЫ

**Барабанная обмотка** – обмотка якоря коллекторных машин постоянного тока, уложенная в пазах шихтованного магнитопровода цилиндрической формы. Выводы обмотки присоединяются к пластинам коллектора. В отличие от кольцевой в барабанной обмотке используются обе стороны катушки обмотки [3, с. 80-82; 4, с. 467].

**Волновая обмотка** – обмотка якоря коллекторной машины, катушки которой через расстояние, равное двойному полюсному делению, присоединяются к коллекторным пластинам (рис. 5.5). Различают право– и левоходовые (рис. 5.5, *а* и 5.5, *б*), а также одно– и двухслойные волновые обмотки.

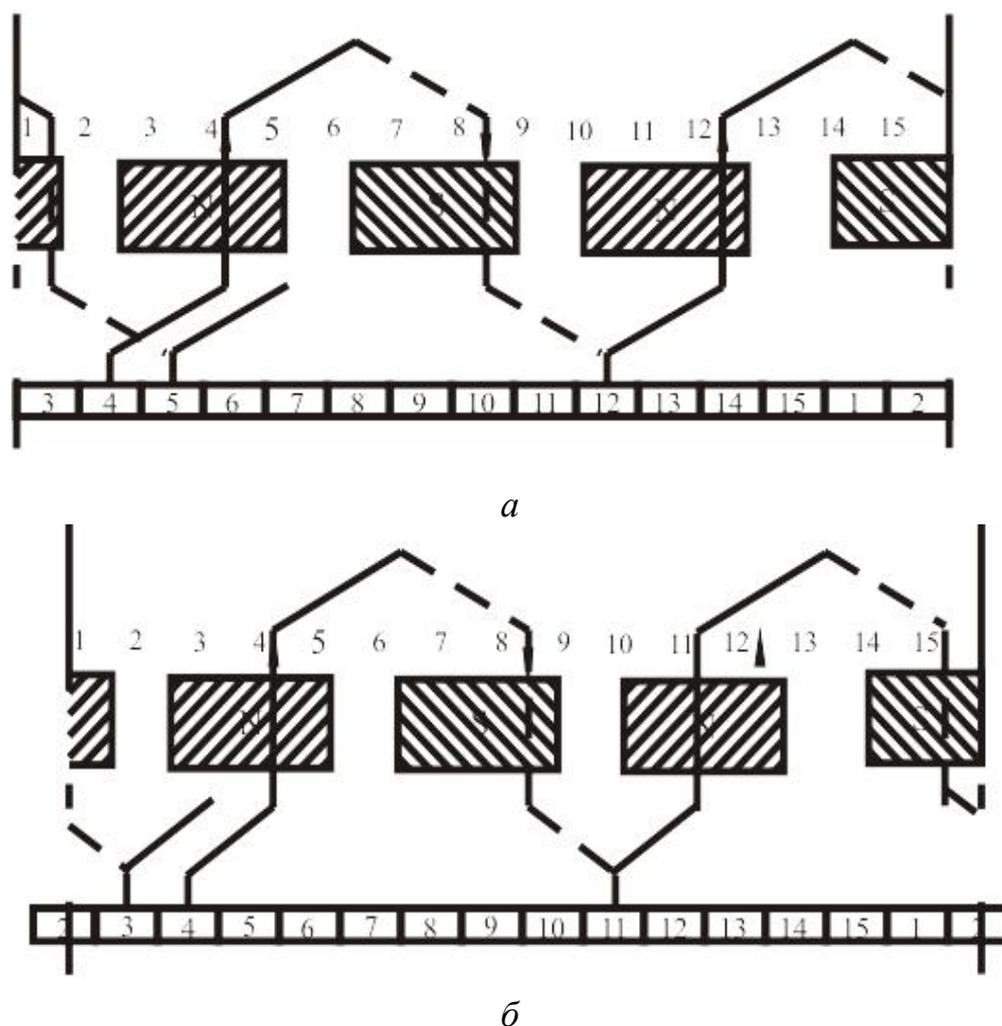


Рис. 5.5

**Всыпная обмотка** – обмотка машин постоянного тока, секции которой изготавливаются на намоточных станках и затем вручную уклады-

ваются в открытые или полуоткрытые пазы. При укладке в пазы вып-ной обмотки следует проявлять осторожность, чтобы избежать повре-ждения пазовой и витковой изоляции. После укладки сторон секций в паз последний закрывается пазовой изоляцией. После укладки обмотки в пазы производится изолирование и бандажирование лобовых частей обмотки. Бандаж позволяет повысить механическую прочность лобо-вых частей. В заключение производится электрическая и визуальная проверка обмотки, а затем пропитка компаундом и сушка обмотки.

**Двухслойная обмотка** – обмотка статора или ротора электри-ческой вращающейся машины, в каждом пазу которых расположено по две катушечные группы. Укладываемые в паз машины катушки располагаются друг над другом, причем одна сторона катушки нахо-дится в нижнем слое одного паза, а другая – в верхнем слое другого паза и стороны имеют противоположное направление (рис. 5.6).

При этом разница в простран-ственном расположении нижней и верхней сторон катушек обмоток от-носительно рабочего воздушного за-зора частично компенсируется соот-ветствующей формовкой лобовых частей обмотки. При использовании провода большого сечения применяются секции специального про-филя. В двухслойной обмотке используется прием укорочения шага с целью улучшения формы напряжения.

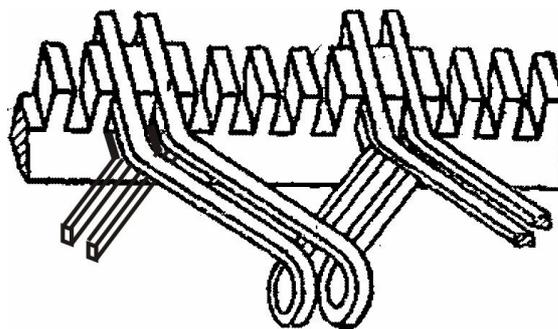


Рис. 5.6

**Катушка (К)** – часть обмотки вращающейся электрической ма-шины, выполненная из одного или нескольких проводов и имеющая прямоугольную или близкую к ней форму (рис. 5.7).

Как правило, К образована из нескольких соединенных после-довательно витков. Значительно реже используется параллельное со-единение витков К. Встречаются К, состоящие всего из одного витка. Каждая К состоит из активных 1 (прямая и обратная стороны) и лобо-вых 2 частей. Активные части К расположены в пазу якоря машины 3. В стержневых обмотках лобовые части называются соответственно

передней и задней перемычками. Если смотреть на К со стороны ее выводов 4, то левая сторона является прямой, а правая – обратной стороной К. Начало и конец катушки определяются направлением ее намотки (право– или левоходовая).

**Катушечная обмотка** – обмотка, сторона катушки которой обра-

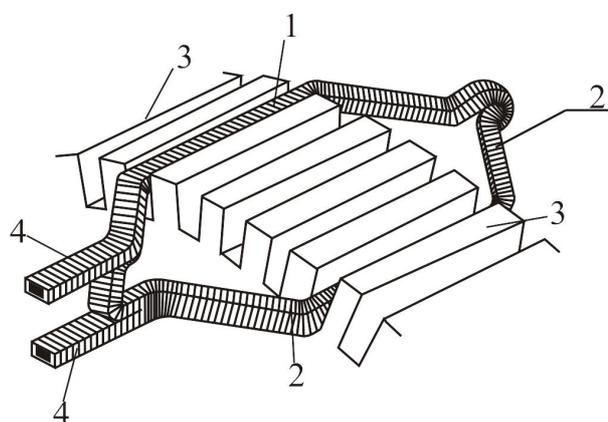


Рис. 5.7

зована одним или несколькими проводами. При изготовлении таких обмоток используется провод круглого или прямоугольного сечения. Катушечные обмотки применяются при изготовлении обмоток якоря машин постоянного тока и обмоток возбуждения.

**Левоходовая петлевая обмотка** (см. петлевая обмотка).

**Несимметричная обмотка** – обмотка якоря машины постоянного тока с несимметричным расположением секций в пределах одного или двух полюсных делений.

На практике для изменения некоторых параметров машины при неизменной конструкции магнитопровода якоря используются несимметричные обмотки. В этом случае соседние секции обмоток якоря имеют различный шаг. Асимметрия может быть также получена неполным подключением выводов секции обмотки якоря к пластинам коллектора или посредством закорачивания нескольких коллекторных пластин. В последнем случае закорачивание может производиться равномерно по окружности коллектора с некоторым шагом. При использовании волновой обмотки также используются «холостые» (или «мертвые») **секции**. Такая обмотка ничем не отличается от обычной, кроме того, что часть выводов не подключается к пластинам коллектора. Присутствие неиспользуемых секций обмотки позволяет облегчить балансировку ротора машины. При наличии перемычек между отдельными пластинами коллектора часть витков обмотки

якоря оказывается закороченной, благодаря чему и создается необходимая асимметрия. Наиболее часто это делается тогда, когда количество выводов секций обмотки якоря не соответствует количеству пластин коллектора [3, с. 101-103].

**Нижний слой обмотки (см. двухслойная обмотка).**

**Обмотка** – алюминиевые или медные проводники, расположенные на полюсах или в пазах статора и ротора электрической машины.

В электрических машинах обмотки предназначены для создания **магнитного потока**. При этом в случае работы машины в режиме генератора в обмотке наводится напряжение, а в случае работы в режиме двигателя посредством обмотки создается вращающий момент.

**Обмотка с равномерным шагом** – петлевая или волновая обмотка якоря, между сторонами секций которой расположено равное количество пазов (рис. 5.8).

**Обмотка якоря коллекторной машины** – кольцевая или барабанная обмотка ротора электрической машины, выполненная из отдельных **секций**, каждая из которых подключена к своей паре коллекторных пластин. Такие обмотки выполняются преимущественно **двухслойными** из круглого или плоского провода (катушечная или стержневая обмотка).

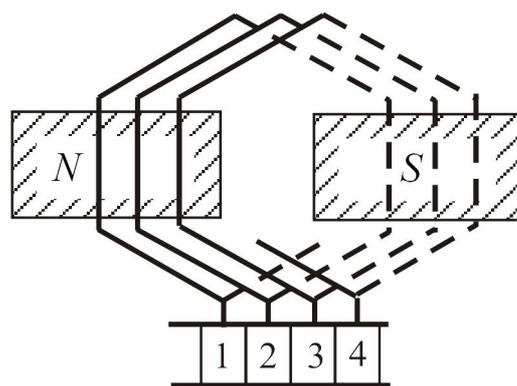


Рис. 5.8

**Обратная секция обмотки (см. двухслойная обмотка).**

**Петлевая обмотка.** В петлевой обмотке  $q$  катушек, расположенных на данном полюсном делении, соединяются между собой последовательно и согласно, образуя катушечную группу.

Петлевые обмотки делятся на одно- и двухслойные, а по направлению укладки на право- и левоходовые. В однослойных обмотках начало секции присоединяется к одной коллекторной пластине, а конец – к другой, соседней коллекторной пластине. В двухслойных обмотках слои располагаются в пазу один над другим. В правоходовой петлевой обмотке обратная ветвь секции обмотки расположена слева

от прямой ветви (рис. 5.9, *a*), в левоходовой обмотке – справа от прямой ветви (рис. 5.9, *б*). Петлевые обмотки называют также параллельными. Они используются в низковольтных электрических машинах с большими токами и могут быть реализованы при любом количестве пазов. Наибольшее распространение петлевые обмотки получили в машинах постоянного тока малой и средней мощности. Обмотка состоит из параллельных ветвей. Параллельная ветвь – это группа последовательно соединенных секций, имеющих одинаковое направление ЭДС, а, следовательно, и тока.

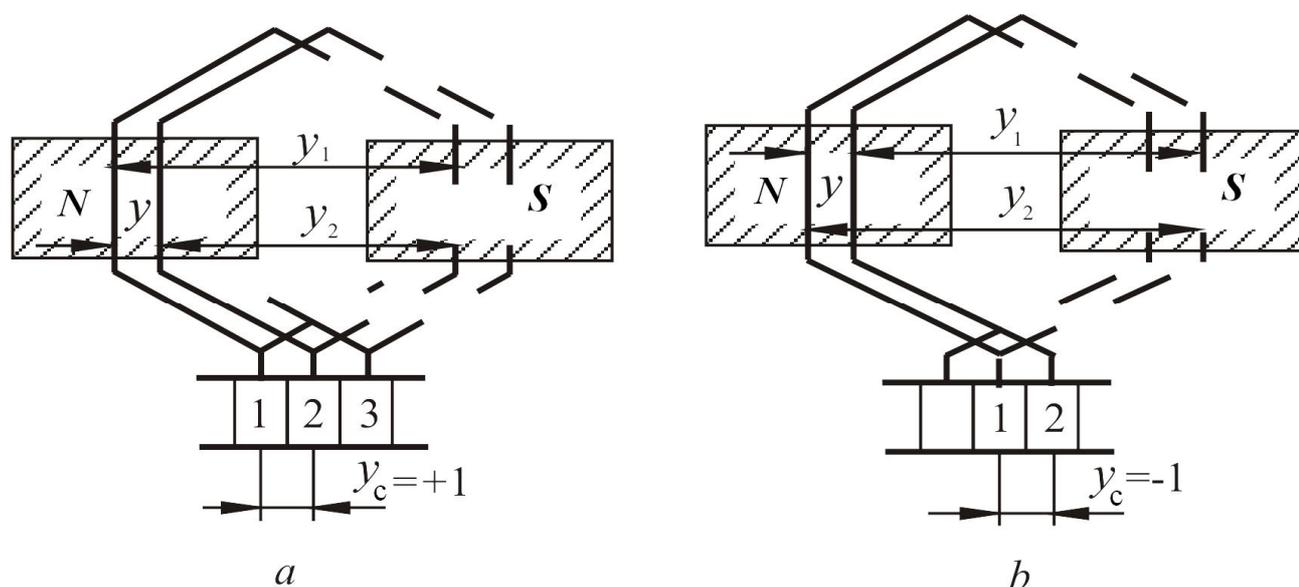


Рис. 5.9

Результирующий шаг петлевой обмотки равен  $y = \pm 1$ . В случае если знак положительный – обмотка правоходовая неперекрещивающаяся, если знак отрицательный – левоходовая перекрещивающаяся. Целесообразнее использовать первый тип обмотки из-за меньшего расхода меди на лобовые части.

На рис. 5.10 приведена развернутая схема простой правоходовой петлевой обмотки.

Обходя схему простой петлевой обмотки слева направо, можно убедиться, что эта обмотка имеет 4 параллельные ветви. Вообще для любой простой петлевой обмотки справедливо соотношение  $2a = 2p$ , где  $2a$  – число параллельных ветвей;  $2p$  – число пар полюсов [1, с. 63-

72; 2, с. 342-345; 3, с. 62, 63, 80-86, 89-99; 4, с. 466, 467, 469-472, 480, 481; 5, с. 161-168; 6, с. 15-23; 7, ч. 2, с. 208-212].

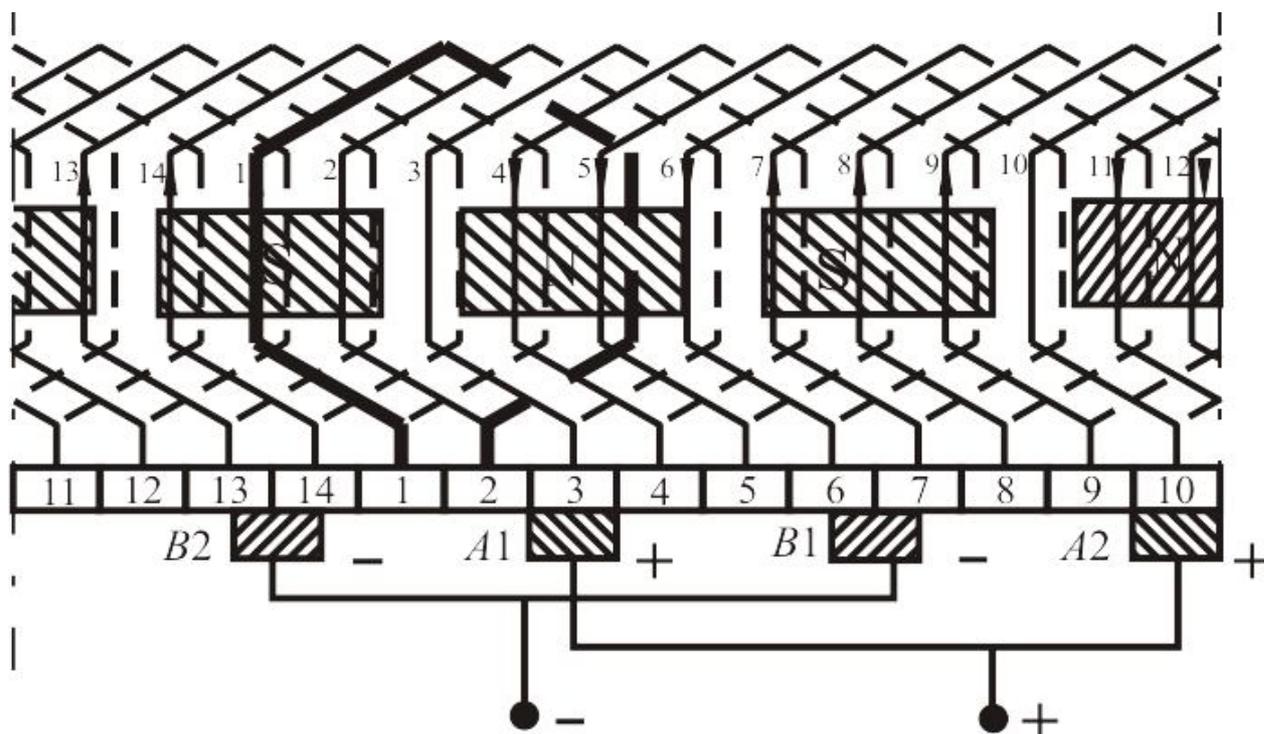


Рис. 5.10

**Секция обмотки.** Основной составной элемент обмотки называется секцией. В секции принято выделять начальную и конечную активную сторону. Общее количество секций обмотки обозначается буквой  $S$ . Секции могут быть одно- и многовитковые. Число витков в секции обозначается  $W_c$ , и это число должно быть минимально возможным.

Все секции соединены между собой последовательно так, что конец предыдущей и начало следующей по схеме обмотки секции припаиваются к одной общей коллекторной пластине. Число коллекторных пластин в коллекторе обозначается  $K$ . Для всех типов обмоток действительно следующее выражение:  $S = K$ .

Секции укладываются в пазы в два слоя так, что если одна из активных сторон секции расположена в верхнем слое паза, то вторая активная сторона размещается в нижнем слое паза, удаленного от исходного на расстояние, называемое шагом обмотки. Количество секций в обмотке якоря должно быть достаточно большим, чтобы снизить пульсации напряжения (электромагнитного момента).

**Сложные петлевые обмотки.** Применяются сравнительно редко в случаях, когда, например, требуется большое количество параллельных ветвей.

Сложная петлевая обмотка получается последовательным соединением секций, активные стороны которых размещены в пазах, отстоящих друг от друга на 2 (редко 3) пазовых деления:  $y_k = y = \pm m$ , где  $m$  – число ходов сложной петлевой обмотки (число простых петлевых обмоток в данной сложной). Простые петлевые обмотки объединяются щетками, которые должны одновременно перекрывать  $m$  коллекторных пластин. Число параллельных ветвей сложной петлевой обмотки:  $2a = 2p \cdot m$ . Шаги этой обмотки такие:  $y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \xi$ ;

$y_2 = y - y_1$  [1, с. 72, 78; 2, с. 346, 347; 3, с. 103-107; 4, с. 472-474; 5, с. 170-173; 6, с. 24; 7, ч. 2, с. 214, 215].

**Сложные волновые обмотки** получаются размещением в пазах якоря нескольких простых волновых обмоток, включенных на параллельную работу между собой щетками. Их применяют для получения большего количества параллельных ветвей. Шаг по коллектору сложной волновой обмотки  $y_k = y = \pm m$ , где  $m$  – число простых обмоток в данной сложной (число ходов). Предпочтение отдается положительному знаку, т.е. левоходовой обмотке. Число параллельных ветвей и второй частичный шаг сложной волновой обмотки  $2a = 2m$ ,  $y_2 = y - y_1$  [1, с. 84-87; 2, с. 349; 3, с. 107-109; 4, с. 477; 5, с. 173-175; 6, с. 25, 26; 7, ч. 2, с. 214, 215].

**Стержневая обмотка** – обмотка, секции которой состоят из одного стержня (рис. 5.11). На указанном рисунке 1 – активная часть обмотки; 2, 3 – задняя и передняя лобовые части.

Стержни имеют, как правило, прямоугольное сечение и изготавливаются из чистой меди. При увеличении сечения стержня усложняется формовка секции обмотки. Поэтому каждая секция в машинах большой мощности изготавливается из нескольких стержней и вкладывается в пазы, а затем секции соединяются со стороны лобовых частей [3, с. 86].

**Сторона катушки (см. секция обмотки).**

**Ступенчатая обмотка** – обмотка якоря машины постоянного тока, секции которой имеют различный шаг.

По сравнению с обычной петлевой обмоткой с одинаковым шагом в машине со ступенчатой обмоткой (рис. 5.12) улучшается **коммутация на коллекторе** [3, с. 84; 4, с. 480, 481].

**Тороидальная (кольцевая) обмотка (ТО)** – обмотка, выполненная в виде спирали, намотанной на сердечнике кольцевой формы.

Обычно ТО используется при изготовлении обмоток якоря машин постоянного тока. При этом выводы ее витков присоединяются к пластинам **коллектора**.

Первые конструкции машин постоянного тока (1860 г.) содержали именно ТО, которые впоследствии были заменены на **барабанные обмотки**. Основными недостатками ТО являются нерациональное использование стали и сложность изготовления.

**Уравнительные соединения** – гальванические связи между секциями петлевых и волновых обмоток электрических машин постоянного тока, предотвращающие дополнительную токовую нагрузку щеток и коллектора.

Причиной неравномерной токовой нагрузки секций обмотки, приводящей к ухудшению условий работы щеточно-коллекторного узла, является магнитная асимметрия машины. Уравнительные соединения выполняются либо на стороне коллектора, либо на стороне лобовых частей обмотки и соединяют точки обмотки, напряжение

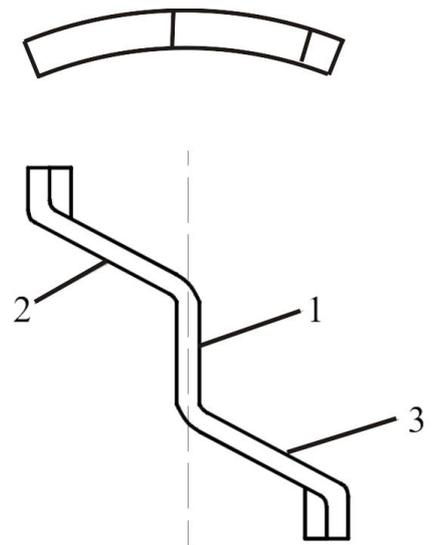


Рис. 5.11

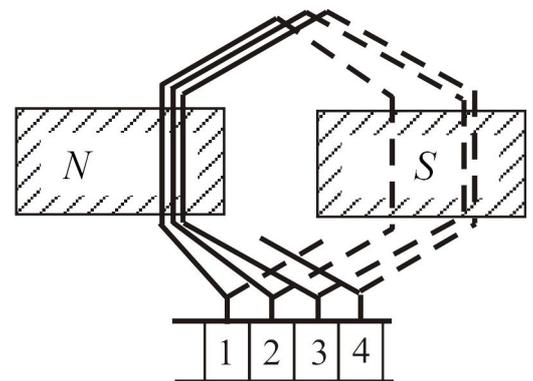


Рис. 5.12

между которыми в идеальной машине должно быть равно нулю [3, с. 110-118; 4, с. 479, 480].

**Шаги обмотки якоря** – расстояние между активными сторонами одной или соседних секций, которое определяется числом зубцовых делений или количеством элементарных пазов. Различают первый частичный шаг по якорю  $y_1$ , который измеряется количеством пройденных по якорю элементарных пазов. Его выбирают близким к полюсному делению.

Расстояние между активными сторонами одной секции называют первым частичным шагом:  $y_1 = \frac{Z_p}{2p} \pm \xi = \text{целое число}$ . Различают следующие обмотки:  $\xi = 0$  – обмотка с полным шагом;  $\xi < 0 \rightarrow y_1 < \tau_p$  – обмотка с укороченным шагом;  $\xi > 0 \rightarrow y_1 > \tau_p$  – обмотка с удлиненным шагом.

При вычислении  $y_p$  возможны два случая: все секции одинаковой ширины – **обмотка с равномерным шагом**, секции неодинаковой ширины – **ступенчатая обмотка**.

Второй частичный шаг по якорю  $y_2$  – это расстояние между конечной активной стороной предыдущей секции и начальной активной стороной следующей по схеме обмотки секции:  $y_2 = y - y_1$ , где  $y$  – результирующий шаг обмотки по якорю – расстояние между начальными активными сторонами предыдущей и следующей за ней по схеме обмотки секции. Он определяется типом обмотки [3, с. 86-89; 4, с. 468, 469; 5, с. 164; 6, с. 22-24; 7, ч. 2, с. 209].

**Элементарный паз.** Пазаы в сердечнике делаются такими, что рядом в каждом слое размещается  $2 \div 3$ , а иногда и более активных сторон секций. Активная сторона одной секции, лежащей в верхнем слое, и активная сторона другой секции, лежащей в нижнем слое, образуют элементарный паз. Количество элементарных пазов обозначается  $u_p$ . Общее число реальных пазов обозначается буквой  $Z$ , а количество элементарных пазов  $Z_p = Z \cdot u_p$  [3, с. 87; 4, с. 467].

Знания по данной теме применяются в решении производственных задач. Поэтому необходимо знать ответы, например, на такие вопросы.

1. Опишите работу машины постоянного тока, если некоторые соседние пластины коллектора замкнуты заусенцами, не удаленными после обточки коллектора. Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

2. Что произойдет, если число уравнительных соединений недостаточно? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

Краткие ответы – подсказки.

1. Щетки искрят; генератор плохо возбуждается; двигатель плохо идет в ход или работает с ненормальной частотой вращения; обмотка якоря местами сильно нагревается.

2. Щетки искрят, наблюдается почернение лишь некоторых коллекторных пластин, находящихся на определенном расстоянии друг от друга (соответственно числу полюсов или пар полюсов). После каждой чистки или обточки коллектора чернеют одни и те же пластины.

## 5.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

Рассчитать шаги и составить таблицу соединений секционных сторон обмотки якоря, начертить в рабочей тетради развернутую схему обмотки якоря (можно для половины числа пазов) и показать на ней несколько уравнительных соединений.

Исходные данные для решения задачи находят в таблице по последней цифре номера зачетной книжки студента. Теоретический материал, необходимый для решения задачи, изложен в [1, с. 53-89; 2, с. 342-345, 347, 348, 350-355; 3, с. 62, 63, 80-103, 109-123; 4, с. 466-472, 474-481; 5, с. 161-170, 175-178; 6, с. 15-25, 27-29, 31-34; 7, ч. 2, с. 208-213].

### Данные для расчета шагов секций обмотки

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
Число пазов якоря	27	31	33	29	37	29	38	38	54	42
Число коллекторных пластин $K$	81	93	99	145	111	87	152	114	108	84

При определении типа обмотки следует иметь в виду, что в петлевой обмотке  $2a = 2p$ ,  $Z$  и  $K$  – четные или нечетные; в волновой обмотке  $2a = 2$ , а  $Z$  и  $K$  – только нечетные. Исходным данным соответствуют простые равносекционные обмотки.

Таблица шагов обмотки или, иначе говоря, таблица соединений секционных сторон учитывает шаги по элементарным пазам. Между тем в исходных данных указано число реальных пазов якоря. Для перехода к расчету шагов по элементарным пазам следует учесть следующее: число элементарных пазов всегда равно числу коллекторных пластин  $Z_{\text{э}} = K$ ; в одном реальном пазе содержится  $u_{\text{т}}$  элементарных пазов.

Полный шаг, второй частичный шаг и шаг по коллектору определяется по соотношениям, приведенным в рекомендуемой литературе и в рассмотренных решениях типовых задач. Там же даны примеры построения таблиц соединения секционных сторон обмотки якоря.

При построении развернутых схем обмотки и определении числа шагов и уравнительных соединений студентам следует руководствоваться примерами и указаниями из рекомендованной литературы.

На схеме обмотки необходимо выделить две последовательно соединенные секции, показать расположение полюсов и щеток на коллекторе, а также  $2 \div 3$  уравнительных соединения.

## **Глава 6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. КОММУТАЦИЯ ОБМОТОК ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **6.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕМЫ**

1. Магнитное поле обмотки возбуждения при холостом ходе МПТ [1, с. 99-100; 3, с. 125; 6, с. 39; 7, ч. 2, с. 216].

2. Магнитное поле обмотки якоря МПТ [1, с. 99, 100; 2, с. 364, 365; 3, с. 125-128; 4, с. 487-490; 5, с. 77; 7, ч. 2, с. 217].

3. Результирующее магнитное поле МПТ [1, с. 100-106; 2, с. 365, 366; 3, с. 129-131; 4, с. 490; 5, с. 77-79; 7, ч. 2, с. 218, 219].

4. Реакция якоря машины постоянного тока [2, с. 366, 367; 3, с. 128-131; 4, с. 490-495; 5, с. 77-79; 6, с. 39-42; 7, ч. 2, с. 219, 220].

5. Реакция якоря МПТ при щетках, сдвинутых с геометрической нейтральной [1, с. 107, 108; 2, с. 367-370; 3, с. 134-136; 4, с. 495-497; 5, с. 82-84; 6, с. 42-48; 7, ч. 2, с. 220, 221].

6. Мероприятия по уменьшению отрицательного влияния реакции якоря [1, с. 109, 110; 2, с. 370, 371; 3, с. 170-172; 4, с. 499-501; 5, с. 96-103; 6, с. 51; 7, ч. 2, с. 222-224].

7. Причины, вызывающие искрение на коллекторе [1, с. 113, 114; 2, с. 374, 375; 3, с. 137, 138, 153-158; 4, с. 504, 505; 5, с. 104, 105, 132; 6, с. 54, 55; 7, ч. 2, с. 224-226].

8. Физическая сущность коммутации [1, с. 115, 116; 2, с. 375, 376; 3, с. 138-140; 4, с. 501, 502, 505, 506; 5, с. 105-110; 6, с. 53].

9. Уравнение и характер коммутации [1, с. 116, 117; 3, с. 140-145; 4, с. 507-509; 5, с. 110-112; 6, с. 55-57; 7, ч. 2, с. 226-228].

10. Виды коммутации. Прямолинейная коммутация [1, с. 118, 119; 2, с. 376-378; 4, с. 509, 510; 5, с. 112, 113; 7, ч. 2, с. 228-230].

11. Криволинейная замедленная и ускоренная коммутация [1, с. 119-121; 2, с. 378-382; 4, с. 510-512; 5, с. 113, 114; 6, с. 57-60; 7, ч. 2, с. 230-238].

12. Способы улучшения коммутации [1, с. 130-137; 2, с. 382-387; 3, с. 161-169; 4, с. 514-523; 6, с. 60-66; 7, ч. 2, с. 238-246].

13. Круговой огонь по коллектору [1, с. 115; 2, с. 388; 3, с. 157, 158, 172, 173; 4, с. 497-499; 5, с. 84-95; 6, с. 51, 52; 7, ч. 2, с. 221, 222].

Каждый вопрос темы изучается по литературе из библиографического списка с учетом методических рекомендаций, изложенных во введении. По мере изучения темы по данному пособию или учебной литературе необходимо составить в рабочей тетради список условных обозначений величин.

## **6.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ**

В результате изучения темы студенты должны  
**ПОМНИТЬ:**

– определение коэффициента полюсного перекрытия, поперечной и продольной оси, геометрической нейтрали; определение физической нейтрали и реакции якоря; понятие поперечной и продольной составляющих реакции якоря; определение коммутации; составляющие суммарной ЭДС за период коммутации; способы улучшения коммутации;

#### ОБЪЯСНЯТЬ:

– понятие линейной нагрузки якоря; отношение между линейной нагрузкой и поперечной составляющей реакции якоря; искажающее влияние реакции якоря на магнитное поле МПТ; методы уменьшения отрицательного влияния реакции якоря; причины искрения на коллекторе механического и электромагнитного характера; физическую сущность коммутации; достоинства и недостатки тех или иных способов улучшения коммутации;

#### УМЕТЬ:

– строить график пространственного распределения полного тока обмотки возбуждения; строить упрощенную картину магнитного поля ОЯ; строить упрощенную картину результирующего поля МПТ; выводить уравнение коммутации и анализировать входящие в него величины; на основе анализа уравнения коммутации для различных значений его переменных классифицировать коммутацию на прямолинейную, ускоренную и замедленную; изображать графически процесс прямолинейной, ускоренной и замедленной коммутации; правильно включать обмотку добавочных полюсов.

Кроме того, студенты должны суметь ответить на следующие вопросы:

1. Дайте определение вектора МДС якоря. Как он ориентирован в пространстве?

2. В чем отличие между продольной и поперечной реакциями якоря?

3. Каким образом поперечная реакция якоря влияет на характер и величину магнитного потока машины и ее ЭДС?

4. Как проявляется связь насыщения магнитной цепи машины и размагничивающего действия поперечной реакции якоря?

5. Какие нежелательные последствия вызывает поперечная реакция якоря?
6. При каких условиях сильнее всего сказывается размагничивающее действие реакции якоря?
7. Что такое физическая и геометрическая нейтраль? Почему щетки устанавливаются на физической нейтрали?
8. Какова роль компенсационной обмотки?
9. В какую цепь включают компенсационную обмотку?
10. Какова форма воздушного зазора в машине с компенсационной обмоткой?
11. Почему у машин без компенсационной обмотки МДС добавочных полюсов больше, чем МДС поперечной реакции якоря?
12. При какой форме воздушного зазора в машине без компенсационной обмотки искажение магнитного поля минимально?
13. Как уменьшить искажающее действие реакции якоря в машине с равномерным зазором при отсутствии компенсационной обмотки?
14. В каком случае воздушный зазор делается большим – при наличии компенсационной обмотки или при ее отсутствии?
15. Назовите факторы, влияющие на ЭДС якоря, в том числе при работе машины.
16. Объясните сущность процесса коммутации и причины возникающего при этом искрения под щетками.
17. Чему равна средняя скорость изменения тока во всех коммутируемых секциях обмотки якоря?
18. Чему равно время изменения направления тока в секции (период коммутации)?
19. Как зависит напряжение на щетках машины постоянного тока от их положения на коллекторе?
20. От каких факторов зависит максимально допустимое напряжение между смежными пластинами коллектора?
21. Почему стремятся к минимальному числу витков в секции обмотки якоря?

22. Напишите уравнение коммутации в простейшем случае (ширина щетки равна коллекторному делению). Найдите решение уравнения, пренебрегая падением напряжения под щетками.

23. Зачем применяются щетки с большим переходным падением напряжения?

24. Что ограничивает максимальную линейную скорость на поверхности коллектора?

25. Когда более вероятно искрение щеток: при большой или малой скорости?

26. Как влияет ширина щетки на значение реактивной ЭДС?

27. Каков физический смысл того, что при увеличении осевой длины коллектора уменьшается напряжение коммутации (склонность машины к искрению)?

28. Как влияет укорочение шага обмотки на коммутацию машины?

29. Как влияет щеточный контакт на процесс коммутации в его завершающей стадии?

30. Нарисуйте диаграммы изменения тока секции при идеальной прямолинейной коммутации. То же при ускоренной и замедленной коммутации.

31. Почему искрение наблюдается обычно только у секции, заканчивающей коммутацию последней в пазу?

32. Зачем нужны в машине добавочные полюсы?

33. Какова роль добавочных полюсов в процессе коммутации?

34. Как производится включение в цепь якоря добавочных полюсов?

35. Какие существуют формы наконечников добавочных полюсов?

36. Как определить полярность добавочных полюсов для генераторного и двигательных режимов?

37. Что такое «круговой огонь на коллекторе»?

38. Почему при ослабленном поле более вероятно появление кругового огня на коллекторе?

39. Что такое зона безыскровой работы?

### 6.3. ЗАДАНИЯ ПО РАБОТЕ С КНИГОЙ

Исходные данные задания определяются с помощью табл. 4.1 по номеру  $N_B$ , который студент узнает у преподавателя. При этом номера учебных пособий, указанных в табл. 4.1, соответствуют номерам источников, приведенных в списке рекомендованной литературы. Все задания выполняются в рабочей тетради студента и предъявляются преподавателю для проверки.

1. Студенты, получившие варианты задания с 1 по 35, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для первого вопроса **главы 6** и двенадцатого вопроса **главы 6**, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для второго вопроса **главы 6** и десятого вопроса **главы 6**.

Студенты, получившие варианты задания с 36 по 70, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для третьего вопроса **главы 6** и девятого вопроса **главы 6**, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для шестого вопроса **главы 6** и восьмого вопроса **главы 6**.

2. Необходимо изложить в рабочей тетради основные мысли текста из книг, относящихся к вашему варианту (по образцу табл. 4.2).

#### 6.4. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

В результате изучения главы 6 нужно научиться решать следующие типовые задачи.

**Задача 6.1.** Тема: магнитное поле машины постоянного тока [2, с. 364; 3, с. 125; 6, с. 39; 7, ч. 2, с. 216].

1. Изобразить силовые линии магнитного поля возбуждения на рис. 6.1, *а*. Показать стрелками их направление.

*Решение.* Определим направление магнитных силовых линий между полюсами (см. **правило правоходового винта**, тезаурус понятий темы главы 3).

2. Обозначить на рис. 6.1, *б* полюсы буквами.

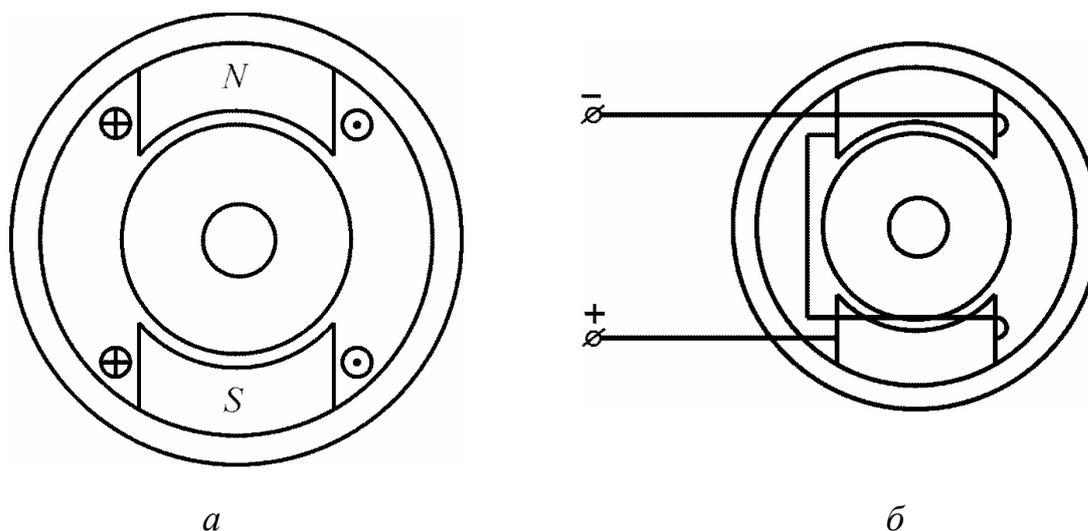


Рис. 6.1

*Решение.* Определим полярность электромагнитов (см. **правило правоходового винта**, тезаурус понятий темы главы 3).

3. Указать направление тока в катушках обмотки возбуждения, представленной на рис. 6.2.

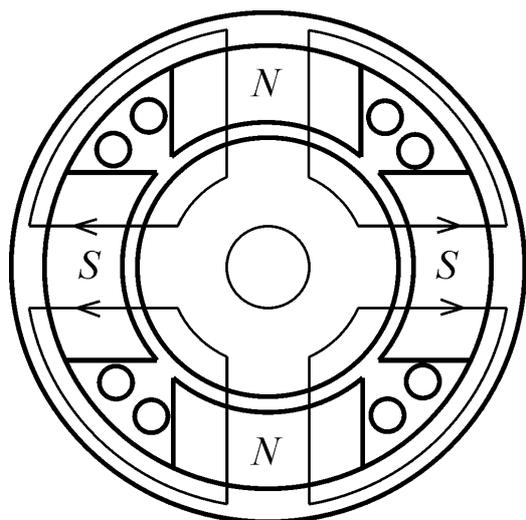


Рис. 6.2

*Решение.* Определим направление ЭДС, индуцируемой в проводнике, и тока в нем (см. **правило правоходового винта**, тезаурус понятий темы 3).

**Ответы:** 1) силовые линии магнитного поля направлены вниз; 2) верхний полюс – северный,  $N$ ; нижний – южный,  $S$ ; 3) направление тока показано на рис. 6.3.

**Задача 6.2.** Привести рисунок, поясняя порядок построения кривых пространственного распределения падения магнитного напряжения на воздушном зазоре МПТ, поперечное сечение которой представлено на рис. 6.4 [2, с. 364; 3, с. 125; 6, с. 39; 7, ч. 2, с. 216].

*Решение.* Исходные допущения при анализе задачи: якорь гладкий беспазовый; сердечники – идеальные ферромагнетики, то есть  $\mu = \infty \Rightarrow Hl = 0$ ; ток в обмотке якоря отсутствует:  $I_a = 0$ , а по обмотке возбуждения протекает ток  $I_f$ .

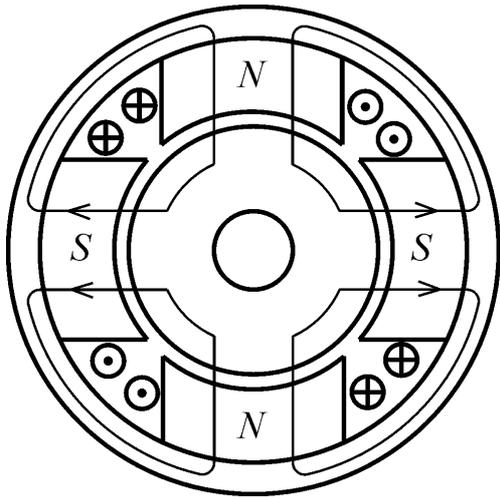


Рис. 6.3

Количественная связь между магнитным полем и электрическим током, создавшим его, устанавливается законом полного тока:

$$\oint H \cdot dl = \sum i = 2I_f \cdot w_f = 2F_f,$$

где  $F_f$  – МДС одной полюсной катушки.

Учитывая то, что магнитная проницаемость магнитного материала принята равной бесконечности, падение магнитного напряжения на всех участках, кроме воздушного зазора, будет равно нулю:  $H_c l_c + H_a l_a + 2H_m h_m = 0$ . Следовательно,  $H_\delta \delta = F_f$ . Направление магнитных силовых линий под соседними полюсами противоположно, поэтому график падения магнитного напряжения в функции  $\alpha$  представляет собой прямые параллельные оси  $\alpha$ .

Предположим, что полный ток двух полюсных катушек сосредоточен по оси симметрии межполюсного пространства (рис. 6.4).

На рис. 6.5 представлена кривая пространственного распределения падения магнитного напряжения вдоль воздушного зазора. Эта кривая представляет собой периодическую функцию прямоугольной формы, основание которой равно полюсному делению, а высота – МДС одной полюсной катушки.

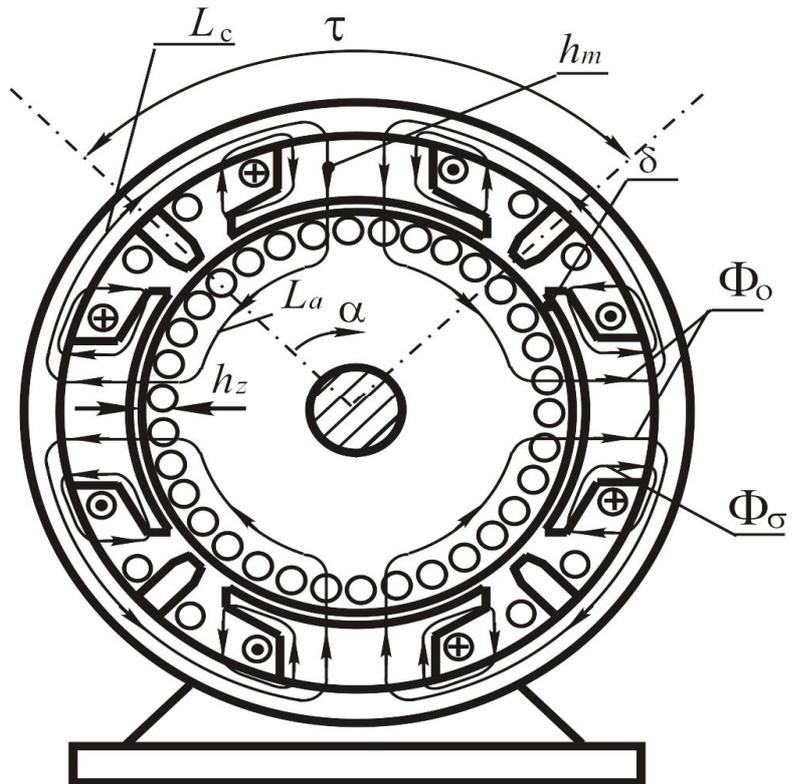


Рис. 6.4

Заменяя интегрирование в выражении с использованием закона полного тока суммированием на различных участках магнитной цепи и приняв во внимание второе допущение, мы получим  $2H_{f\delta} \cdot \delta = 2F_f$ , где  $H_{f\delta}$  – напряженность магнитного поля возбуждения в зазоре.

$$\text{Тогда } H_{f\delta} = \frac{F_f}{\delta}; \quad B_{f\delta} = \mu_0 \cdot H_{f\delta} = \mu_0 \cdot \frac{F_f}{\delta}.$$

Построим кривую пространственного распределения индукции магнитного поля обмотки возбуждения  $B_{f\delta}(\alpha)$ .

Ее вид зависит от пространственного распределения падения магнитного напряжения вдоль воздушного зазора и конфигурации воздушного зазора между сердечником якоря и полюсом.

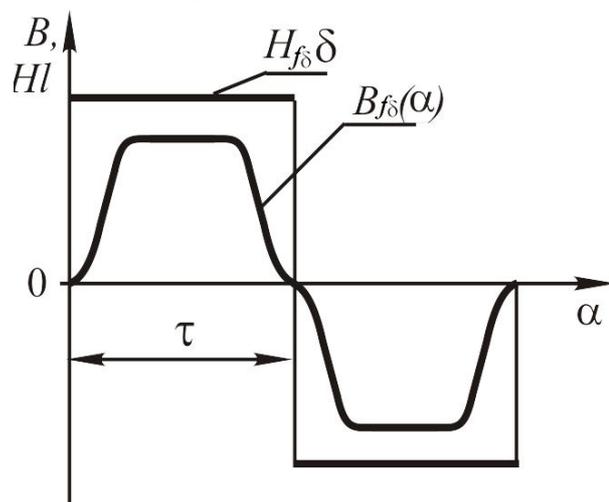


Рис. 6.5

Введем еще несколько понятий, поясняющих рисунок. Коэффициент полюсного перекрытия определяется следующим выражением:

$$\alpha_{\delta} = \frac{b_p}{\tau},$$

где  $b_p$  – расчетная ширина полюсного наконечника.

В машинах с явнополюсной конструкцией индуктора – полюсной системы (МПТ, синхронные машины) – вводят следующие понятия: продольная магнитная ось симметрии (продольная ось) – это линия, совпадающая с осью симметрии полюса, обозначается  $d$ ; поперечная

магнитная ось симметрии (поперечная ось) – это линия, совпадающая с осью симметрии межполюсного пространства, обозначается  $q$ .

Магнитное поле, ось симметрии которого совпадает с осью  $d$ , называется продольным. Магнитное поле, ось которого совпадает с осью  $q$ , называется поперечным. Из рис. 6.4, 6.5 видно, что полный ток и магнитное поле обмотки возбуждения – продольные.

Линия на поверхности якоря, проходящая в осевом направлении точно посередине между главными полюсами, называется геометрической нейтралью (ГН). Вдоль этой линии магнитная индукция поля возбуждения равна нулю.

**Задача 6.3.** Поле якоря в машине постоянного тока [1, с. 99, 100; 2, с. 364, 365; 3, с. 125-128; 4, с. 487-490; 5, с. 77; 7, ч. 2, с. 217].

В случае, если МПТ, схема которой изображена на рис. 6.6, работает в режиме генератора, выполнить следующее.

1. Определить и обозначить буквами полярность главных полюсов.
2. Определить и указать в проводниках обмотки якоря направление тока и ЭДС.
3. Изобразить магнитные силовые линии поля якоря и показать стрелками их направление.
4. Обозначить полюсы якоря.

*Примечание.* При выполнении заданий (п. 1 – 4) следует учесть, что в генераторе направления ЭДС и тока в обмотке якоря совпадают.

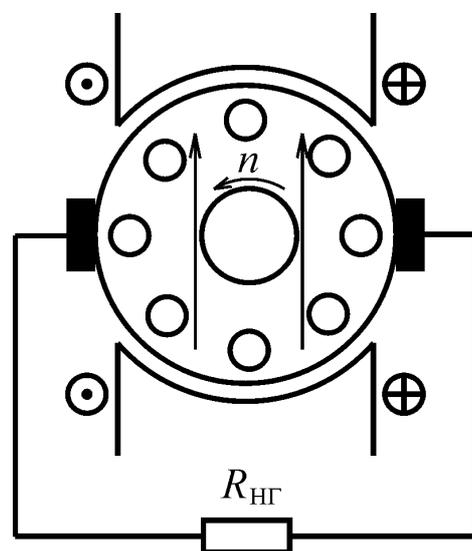


Рис. 6.6

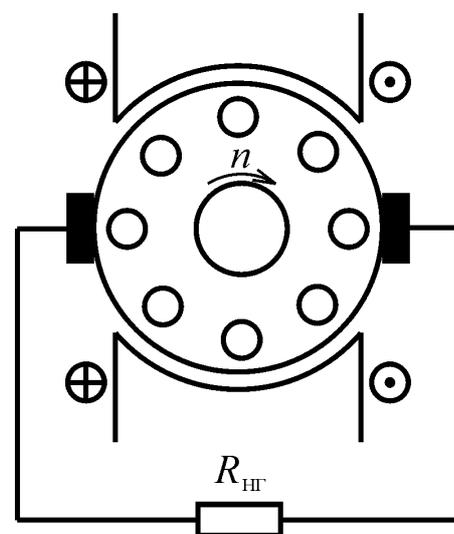


Рис. 6.7

5. Изобразить на рис. 6.7 магнитные линии поля возбуждения и показать стрелками их направление. Дать определение и показать геометрическую нейтраль.

6. На рис. 6.8 определить и показать направление тока в проводниках обмотки якоря. Изобразить магнитные линии поля якоря и показать стрелками их направление.

В случае, если МПТ работает в режиме двигателя (рис. 6.9), выполнить следующее.

7. Указать направление тока в катушке возбуждения нижнего полюса. Определить и обозначить полярность главных полюсов, изобразить силовые линии поля возбуждения.

8. Показать направление электромагнитных и механических сил и моментов, действующих на якорь, и направление вращения якоря.

*Примечание.* Следует учесть, что в двигателях направление электромагнитного момента совпадает с направлением вращения якоря, а момент сопротивления  $M_2$  и момент потерь  $M_0$  направлены встречно вращению якоря.

9. Указать направление ЭДС и токов в обмотке якоря.

*Примечание.* Следует учесть, что в двигателях ЭДС и токи направлены встречно.

**Ответы:** 1) верхний полюс – южный,  $S$ ; нижний – северный,  $N$ ; 2) направление тока и ЭДС в проводниках ОЯ совпадает, под щетками тока нет, в проводниках под южным полюсом ток направлен от нас, в проводниках под северным полюсом – к нам; 3, 4) силовые линии магнитного поля и полюса якоря приведены на рис. 6.10;

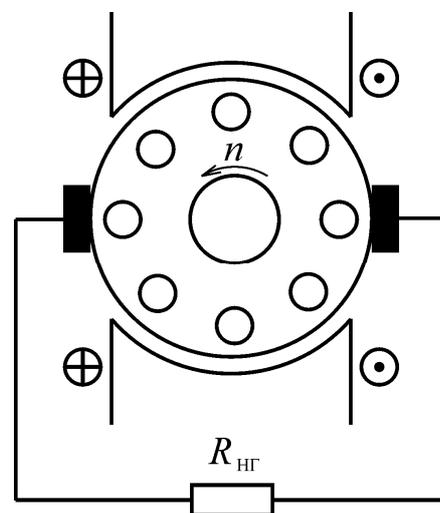


Рис. 6.8

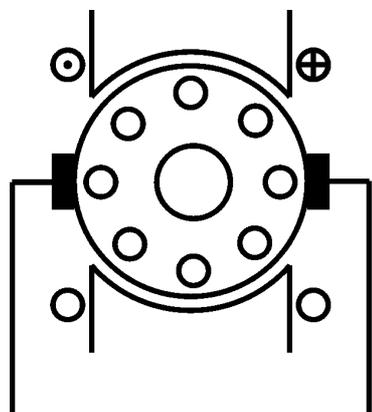


Рис. 6.9

5) верхний полюс – северный,  $N$ ; нижний – южный,  $S$ ; силовые линии магнитного поля направлены вниз. Геометрическая нейтраль – линия на поверхности якоря, проходящая в осевом направлении точно посередине между главными полюсами, вдоль этой линии магнитная индукция поля возбуждения равна нулю; 6) рис. 6.11 (следует использовать в качестве «подсказки» ответы на 3 и 4 задания и рис. 6.7 – 6.10).

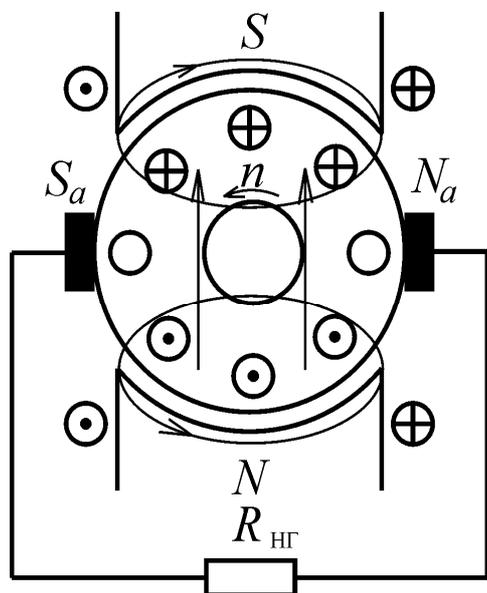


Рис. 6.10

4) следует использовать в качестве «подсказки» ответы на 3 и 4 задания и рис. 6.7 – 6.10).

**Задача 6.4.** Привести рисунок, поясняя порядок построения кривых пространственного распределения МДС и магнитного поля обмотки якоря (рис. 6.12) для случая, когда щетки стоят на геометрической нейтрали [1, с. 99, 100; 2, с. 364, 365; 3, с. 125-128; 4, с. 487-490; 5, с. 77; 7, ч. 2, с. 217].

Исходные допущения такие же, как и в задаче 6.2, кроме того, считается, что щетки расположены по линии геометрической нейтрали. Якорь гладкий, проводники равномерно распределены по окружности. Отсутствует насыщение магнитной цепи. Количественная связь между полем и током, его создавшим, устанавливается законом полного тока.

Пусть  $i_a$  – ток в проводнике обмотки якоря;  $N$  – полное число проводников обмотки якоря;  $D_a$  – диаметр якоря. Ток, протекая по обмотке якоря, возбуждает магнитное поле. Алгебраическая сумма полного тока зависит от выбранного контура интегрирования. Воспользуемся законом полного тока и выполним интегрирование по контуру  $\oint H \cdot dl = \sum i$ .

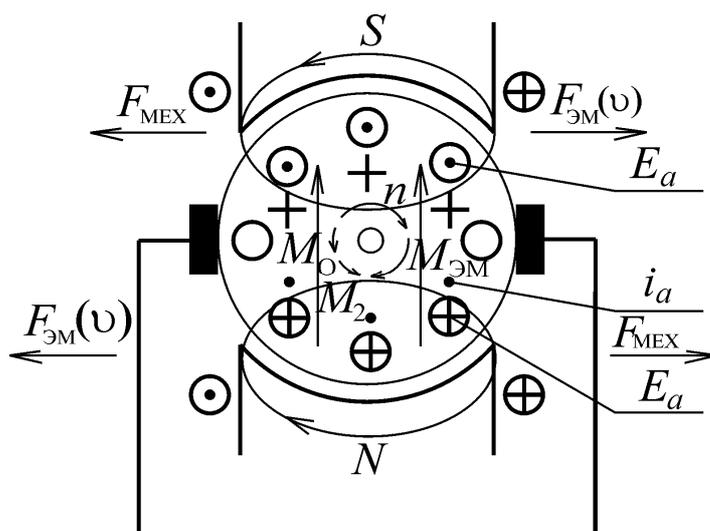


Рис. 6.11

Выполняя интегрирование по контурам, получаем, что суммарный ток  $\sum i$  изменяется по величине. При изменении направления интегрирования меняется знак тока. При этом направление тока к нам (знак  $\bullet$ ) принимается за положительное:

$$\sum i = 2 \cdot \left( \frac{i \cdot N}{2p \cdot \pi} \right) \cdot \alpha = 2 \frac{F_{aq}}{\pi} \alpha,$$

где  $F_{aq}$  – полный ток или поперечная МДС обмотки якоря;

$$F_{aq} = \frac{i \cdot N}{2p} \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{\pi \cdot D_a} = \frac{i \cdot N}{\pi \cdot D_a} \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{2p} = A \cdot \tau,$$

где  $A$  – линейная нагрузка якоря (величина полного тока, приходящаяся на единицу длины окружности якоря), единица измерения А/м.

Построим график  $F_{aq}$  на кривых пространственного распределения МДС и магнитного поля обмотки якоря, соблюдая следующие правила построения.

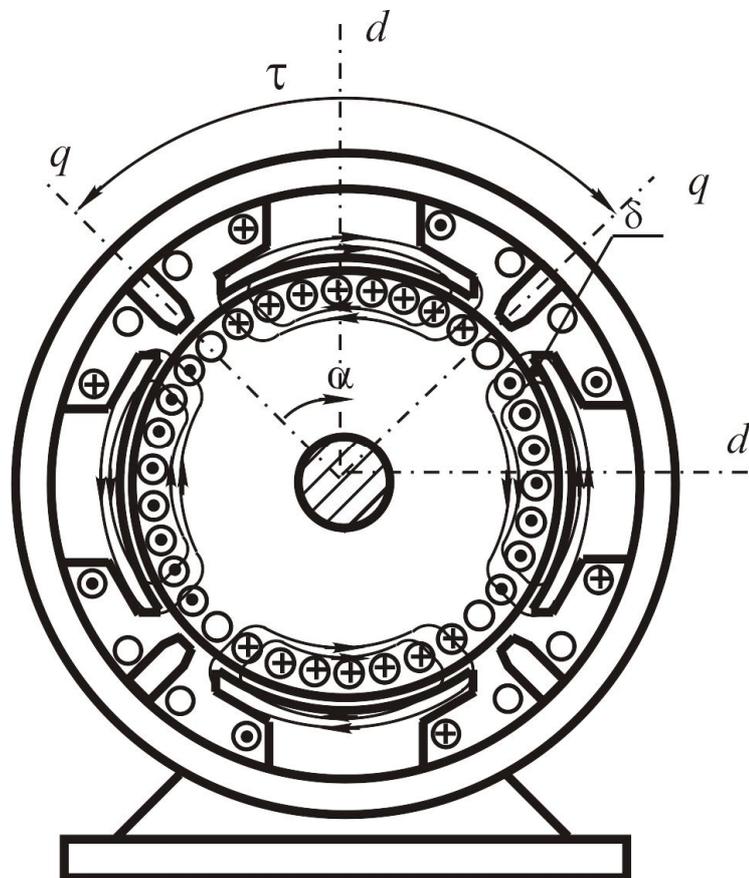


Рис. 6.12

Строится картина распределения проводников. Указывается направление тока в них и величина.

Строится ломаная линия слева направо. В местах отсутствия проводников с током строятся горизонтальные отрезки прямых, в местах проводников с током – вертикальные отрезки.

В случае положительного тока вертикально вверх проводится отрезок, длина которого в выбранном мас-

штабе равна величине полного тока в этой точке.

В случае отрицательного тока отрезки строятся в отрицательном направлении оси ординат.

Предположим, что ток сосредоточен по центру проводника. Тогда

$$\text{при } \alpha = \frac{\pi}{12} \Rightarrow \sum i = \frac{F_{aq}}{12}, \text{ а при } \alpha = \frac{\pi}{6} \Rightarrow \sum i = \frac{F_{aq}}{6}.$$

Построим кривую поля якоря  $B_{aq\delta}$ . Запишем принятые допущения:  $I_a \neq 0$ ,  $I_f = 0$ ,  $H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} = 0$

при  $\mu_{Fe} = \infty$ .

Заменяя интегрирование суммированием и учитывая допущение  $\mu_{Fe} = \infty$ , получим

$$2H_{aq\delta} \cdot \delta = \frac{2F_{aq}}{\pi} \cdot \alpha; B_{aq\delta} = \frac{\mu_0 \cdot F_{aq} \delta}{\delta \cdot \pi} \cdot \alpha.$$

Следовательно, поле обмотки якоря пропорционально МДС этой обмотки и обратно пропорционально величине зазора  $\delta$ .

Из рис. 6.12 видно, что магнитная ось поля якоря и ось симметрии полного тока якоря совпадают с поперечной осью  $q$  симметрии индуктора. Такое магнитное поле с индукцией  $B_{aq}$ , магнитодвижущая сила и ток, ее создавший, называются поперечными, т. е. при щетках, установленных по линии геометрической нейтрали, магнитное поле якоря – поперечное.

Графики распределения падения магнитного напряжения и индукции в воздушном зазоре представлены на рис. 6.13. Вертикальные линии графика совпадают с осями проводников. Уменьшение индукции в зазоре на поперечных осях обусловлено большим удельным магнитным сопротивлением воздушного зазора в зоне этих осей.

**Задача 6.5.** Привести рисунок, пояснить порядок построения кривой результирующего магнитного поля машины постоянного тока при щетках, стоящих на геометрической нейтрали. Дать оценку влиянию поля якоря на поле возбуждения [1, с. 100, 101; 2, с. 364-369; 3, с. 128-131, 134-136; 4, с. 487, 490-497; 5, с. 77-79, 82-84; 6, с. 39-44; 7, ч. 2, с. 216-221].

В электрической машине, работающей под нагрузкой, токи протекают одновременно и по обмотке возбуждения, и по обмотке якоря. Можно считать, что каждая из обмоток создаёт свою составляющую магнитного поля. При отсутствии насыщения магнитной цепи ( $\mu_{Fe} = \infty$ ) кривую пространственного распределения результирующего поля (рис. 6.14) можно получить сложением ординат кривых магнитных полей возбуждения и якоря. Построим кривую результирующего магнитного поля машины постоянного тока при щётках, стоящих на геометрической нейтрали.

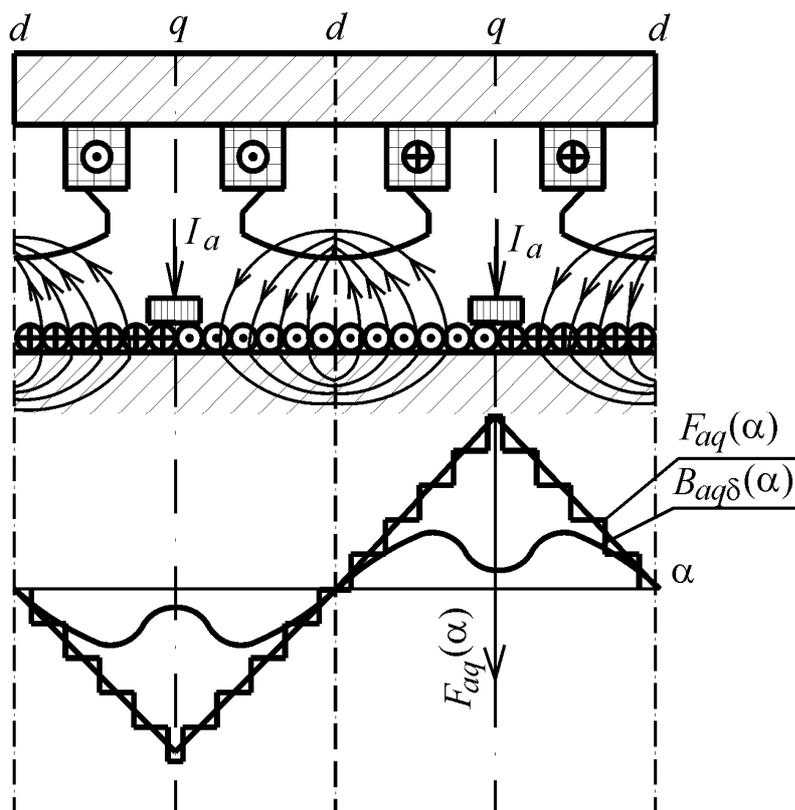


Рис. 6.13

Воздействие поля якоря на поле возбуждения называется реакцией якоря. Проведем оценку поперечной реакции якоря при щётках, установленных на геометрической нейтрали.

На рис. 6.14 кривая  $B_1(\alpha)$  показывает распределение индукции в зазоре машины, работающей в режиме холостого хода, т.е. при токе якоря, равном нулю. Кривая  $B_2(\alpha)$  показывает распределение индукции в зазоре машины от действия тока якоря при токе возбуждения, равном нулю. Кривая  $B(\alpha)$  показывает распределение индукции в зазоре работающей машины. На рисунке линия  $d$  соответствует «продольной оси» машины – линии, проходящей по оси симметрии явно выраженного полюса. Линия  $q$  соответствует «поперечной оси» машины – линии, проходящей по оси симметрии в межполюсном пространстве.

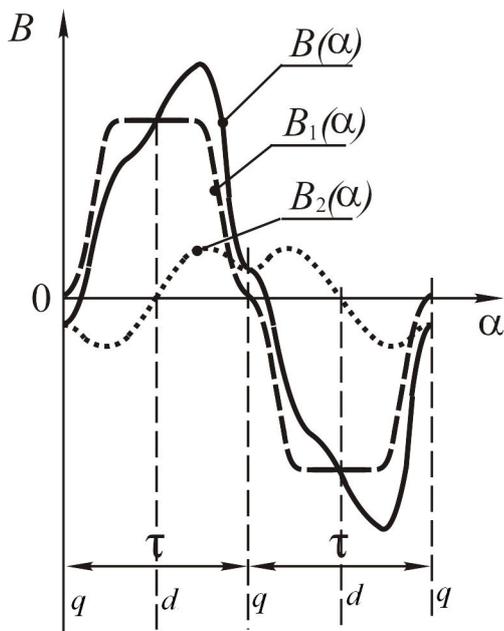


Рис. 6.14

Рис. 6.14 показывает, что поперечная реакция якоря усиливает магнитное поле под одним краем полюса и ослабляет его под другим краем полюса, что приводит к искажению формы кривой магнитного поля. Величина результирующего магнитного поля при отсутствии насыщения остается неизменной.

В реальных условиях магнитную цепь машины выполняют так, что она находится в состоянии насыщения (коэффициент насыщения  $K_s = 1,4 \div 1,45$ ), поэтому раз-

магничивающее влияние поперечной реак-

ции якоря на одном крае полюсного наконечника проявляется сильнее, чем намагничивающее влияние этой же реакции якоря на другом крае полюсного наконечника. В итоге результирующее магнитное поле оказывается ослабленным. Исходя из этого, говорят о размагничивающем действии поперечной реакции якоря.

Уменьшение основного магнитного потока полюсов вследствие размагничивающего влияния поперечной реакции якоря приводит к ухудшению выходных характеристик электрической машины. Например, в генераторе – к уменьшению выходного напряжения с ростом тока нагрузки. В двигателях с параллельным возбуждением уменьшение магнитного потока приводит к увеличению скорости вращения при прочих равных условиях.

Вследствие искажения магнитного поля нагруженной машины ухудшается работа коллекторно-щеточного узла. Активные стороны коммутируемых секций попадают в зону усиленного магнитного поля. В этих секциях может индуцироваться большая величина ЭДС, способная привести к пробое воздушного промежутка между соседними коллекторными пластинами, к которым припаяны секции. Этот процесс сопровождается искрением между данными пластинами (потенциальное ис-

крение), которое вместе с искрением из-под щеток может привести к возникновению кругового огня на коллекторе. Возникновение кругового огня на коллекторе может привести к выходу из строя машины.

При анализе магнитного поля машины постоянного тока используют понятия геометрической и магнитной нейтралей. Геометрической нейтралью называют линию симметрии машины, проходящую в межполюсном пространстве поперечного сечения машины. Магнитной или физической нейтралью называют линию, проходящую через точки воздушного зазора, в которых индукция результирующего магнитного поля равна нулю. Геометрическая нейтраль и магнитная нейтраль МПТ, работающей в режиме идеального холостого хода, совпадают. Под действием реакции якоря магнитная нейтраль смещается относительно геометрической нейтрали. Смещение магнитной нейтрали приводит к ухудшению работы щеточно-коллекторного устройства, которое проявляется в усилении искрения под щетками.

Найдем ответ на следующий вопрос. Какое положение будет занимать физическая нейтраль генератора и двигателя (рис. 6.15), работающих под нагрузкой? [2, с. 364–367; 4, с. 492; 7, ч. 2, с. 217, 218]

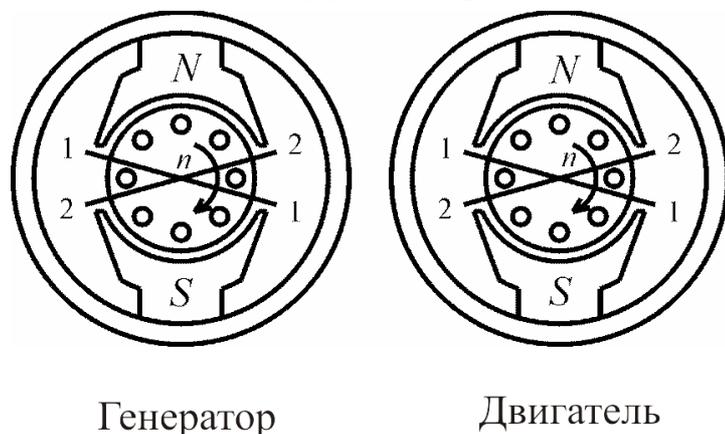


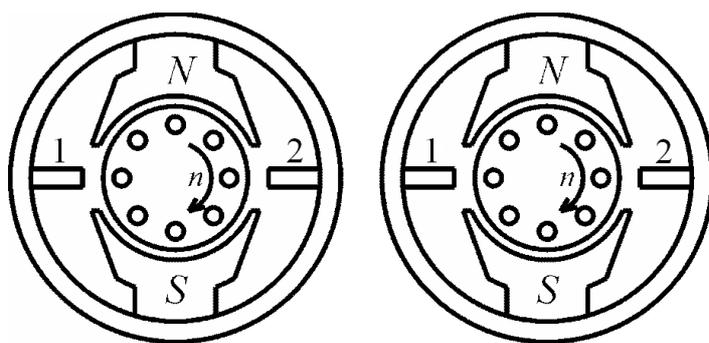
Рис. 6.15

При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, т.е. в положение 1-1, а при работе в режиме двигателя – против вращения якоря, т.е. в положение 2-2, так как направление тока в

обмотке якоря меняется на противоположное.

### Задача 6.6.

1. Определить полярность дополнительных полюсов генератора и двигателя на рис. 6.16.



Генератор

Двигатель

Рис. 6.16

165; 4, с. 519, 520; 6, с. 63; 7, ч. 2, с. 239].

### Решение

1. Назначение добавочных полюсов – создать в зоне коммутации магнитное поле такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутируемой секции ЭДС вращения компенсировала реактивную ЭДС. Для обеспечения компенсации реактивной ЭДС при различных нагрузках машины обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря. В этом случае МДС добавочных полюсов  $F_d$  при различных нагрузках машины изменяется пропорционально току якоря  $I_a$ , т. е. пропорционально МДС якоря  $F_a$ . При этом полярность добавочного полюса в генераторе должна быть такой же, как и у следующего по направлению вращения главного полюса, а в двигателе – как у предшествующего полюса.

Таким образом, для режима генератора полюс 1 – северный, 2 – южный, для режима двигателя полюс 1 – южный, 2 – северный.

2. Обозначим выводы обмоток возбуждения (шунтовых) как  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , а выводы обмоток добавочных полюсов – как  $D_1$  и  $D_2$ . Учтем, что в генераторах постоянного тока за главным полюсом следует дополнительный полюс противоположной полярности. В двигателе постоянного тока по направлению вращения якоря за главным полюсом, наоборот, следует одноименный (северный или южный) дополнительный полюс. Начертим схемы соединения обмоток возбуждения (рис. 6.17).

2. Составить схемы соединения обмоток возбуждения четырехполюсной машины с дополнительными полюсами при работе ее в качестве генератора и в качестве двигателя и одинаковым в обоих случаях направлении вращения. [1, с. 130-134; 2, с. 384–386; 3, с. 164,

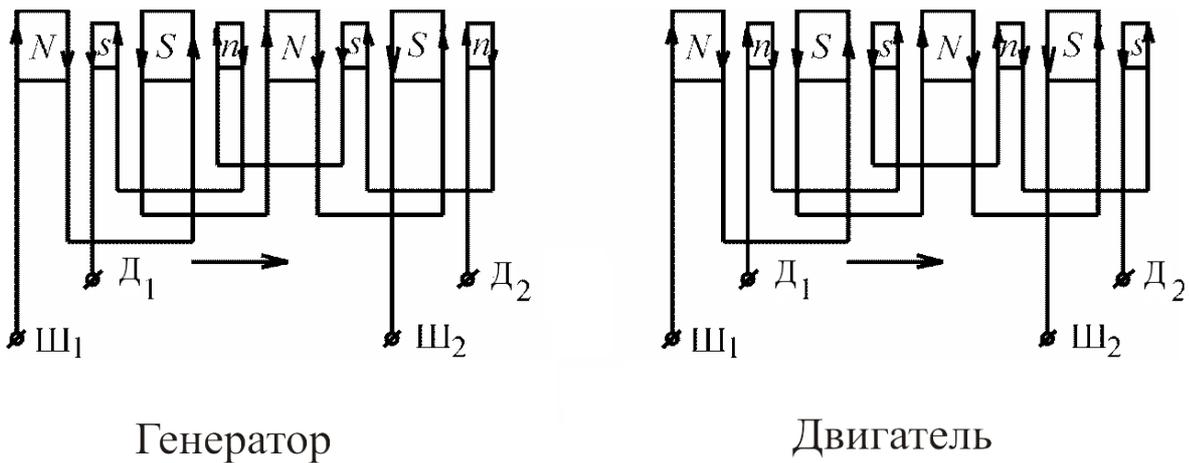


Рис. 6.17

**Задача 6.7.** На рис. 6.18, *a – в* изображены часть обмотки якоря, часть коллектора, а также щетки для трех моментов времени. Под какой частью поверхности щетки, соприкасающейся с поверхностью коллектора, плотность тока будет больше, если машина не имеет дополнительных полюсов и щетки находятся на геометрической нейтрали? [1, с. 124-126; 2, с. 378-381; 3, с. 143, 144; 4, с. 507-511]

Так как по условию задачи в машине нет дополнительных полюсов и щетки находятся на геометрической нейтрали, магнитная индукция в зоне коммутации невелика. Следовательно, суммарная ЭДС определяется главным образом реактивной ЭДС  $e_p = -(L_c + M_c)(di/dt)$ . Реактивное действие суммарной ЭДС, наводимой в коммутируемой секции, препятствует изменениям тока в этой секции от  $+i_a$  в начале коммутации до  $-i_a$  в ее конце. По этой причине в середине периода коммутации ток в коммутирующей секции  $i_a = i_d$ , т.е. он не равен нулю, как это имело бы место при прямолинейной коммутации. Уменьшение тока  $i_a$  до нуля и изменение его направления наступают во второй половине периода коммутации в момент времени  $t > 0,5 T_k$ , т.е. по сравнению с прямолинейной в рассматриваемом виде коммутацией процесс изменения направления тока в коммутирующей секции затягивается во времени. Такую коммутацию называют **криволинейной замедленной**. Характерный признак этого вида коммутации – неодинаковая плотность тока под щеткой в начале и в конце периода коммутации.

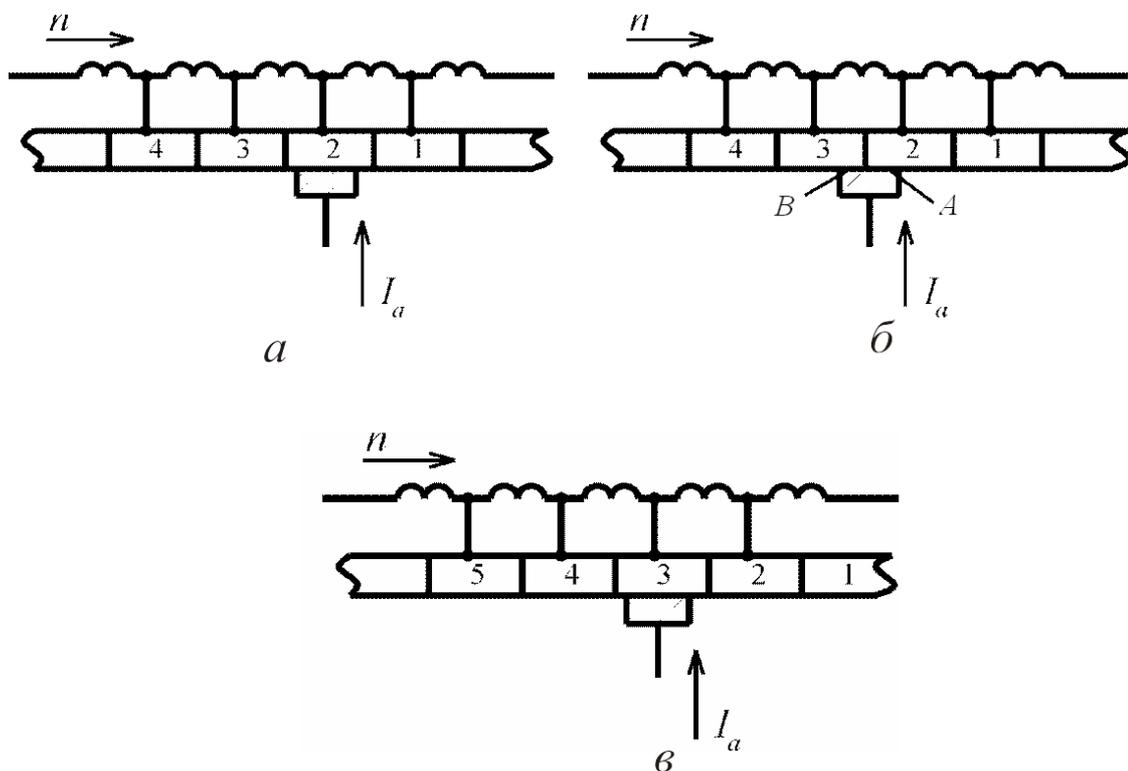


Рис. 6.18

Среднее значение плотности тока под набегающим краем щетки  $j_B$ , имеющим контакт с пластиной 3 (см. рис. 6.18, б), меньше среднего значения плотности тока  $j_A$  под сбегающим краем щетки, имеющим контакт с пластиной 2. С одной стороны, это объясняется тем, что  $\operatorname{tg} \alpha_2 < \operatorname{tg} \alpha_1$  (рис. 6.32), а с другой – тем, что при  $t = 0,5 T_k$  токи, отходящие в обмотку якоря через пластины 2 и 3, не равны:  $i_3 < i_2$ . При криволинейной замедленной коммутации площадь  $S_2$  соприкосновения пластины 1 с щеткой уменьшается быстрее, чем ток  $i_2 = i_a + i_d$ , а поэтому плотность тока под сбегающим краем щетки повышается. К концу периода коммутации эта плотность тока достигает наибольшего значения.

## 6.5. ТЕЗАУРУС ПОНЯТИЙ ТЕМЫ

Если понятия в тезаурусе раскрываются с достаточной полнотой, то ссылки на рекомендуемую литературу не даются.

**Геометрическая нейтраль** – линия поперечного сечения МПТ, проходящая точно посередине между основными полюсами (рис. 6.19). При установке щеток на геометрической нейтрали обеспечива-

ется безыскровая **коммутация** обмотки якоря машины, работающей в режиме холостого хода [4, с. 457].

**Искрение под щеткой** – искрение между рабочей поверхностью щетки и поверхностью **коллектора** машины постоянного тока.

Работа МПТ сопровождается искрением – это происходит в обязательном порядке. Искрение принято оценивать визуально. В качестве показателей степени искрения служат интенсивность, размер искр и состояние поверхности скользящего контакта. Различают 4 степени искрения: 1; 1,5; 2 и 3.

Причины искрения подразделяются на причины механического и электромагнитного характера.

Причины механического характера вызваны механическим несовершенством коллекторно-щеточного узла (слабым нажатием щетки на коллектор, несоответствием размеров щетки размерам колодца щеткодержателя, выступанием отдельных коллекторных пластин либо изоляционного промежутка между пластинами, нецилиндрической поверхностью коллектора).

Причины электромагнитного характера подразделяются на два типа – потенциальные и коммутационные. Потенциальные причины (разность между пластинами выше допустимого уровня) вызваны искажающим влиянием поперечной реакции якоря. Потенциальное искрение наблюдается на участках коллектора, не занятых щетками.

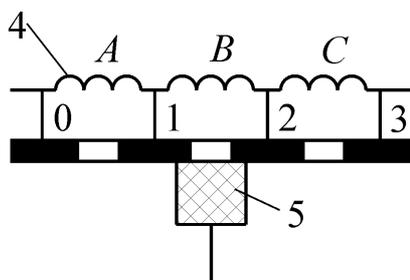


Рис. 6.20

Коммутационные причины искрения – это основные причины искрения МПТ, которые сложно устранить. При этом искрообразование зависит от величины электромагнитной энергии, запасенной в коммутируемой секции за период коммутации. При вращении якоря щетки и коллектор образуют скользящий кон-

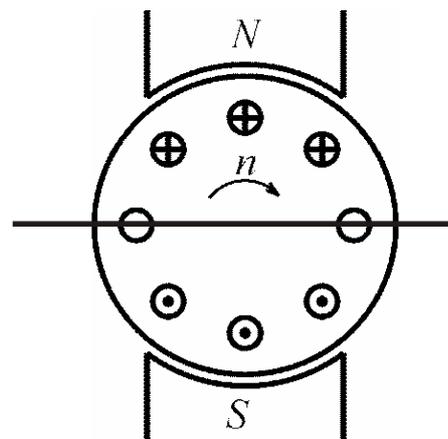


Рис. 6.19

такт. При этом неизбежно замыкание и размыкание соседних пластин щетками, а одновременно с ними замыкание накоротко и размыкание секций, припаянных к этим пластинам. На рис. 6.20 коллекторные пластины 1 и 2 присоединены к выводам секции *B* обмотки якоря 4 и замыкаются щеткой 5. При смещении последней влево или вправо (соответственно коллекторные пластины 0 и 3) в момент коммутации возникает искрение.

Искрение чаще наблюдается под сбегающими краями щеток [1, с. 113-115; 2, с. 374, 375; 3, с. 137, 138, 153-157; 4, с. 503-505; 5, с. 104, 105, 132; 6, с. 54, 55; 7, ч. 2, с. 224-226].

**Коммутация секций в коллекторной машине** – периодическое переключение секций обмотки якоря машины постоянного тока из одной параллельной ветви в другую параллельную ветвь с целью поддержания заданного направления тока на внешних зажимах МПТ. В машинах постоянного тока коммутация осуществляется с помощью щеточно-коллекторного устройства, являющегося (в режиме генератора) механическим выпрямителем переменного тока [1, с. 115-120; 2, с. 375, 376; 3, с. 138-140; 4, с. 501, 502, 505, 506; 5, с. 105-110; 6, с. 53].

Физическая сущность процесса коммутации для различных моментов времени представлена на рис. 6.21.

Из рисунков видно, что в процессе коммутации секции переключаются из одной параллельной ветви в другую параллельную ветвь. Процесс переключения сопровождается изменением напряжения и тока в секции. График изменения тока в переключаемой секции представлен на рис. 6.22.

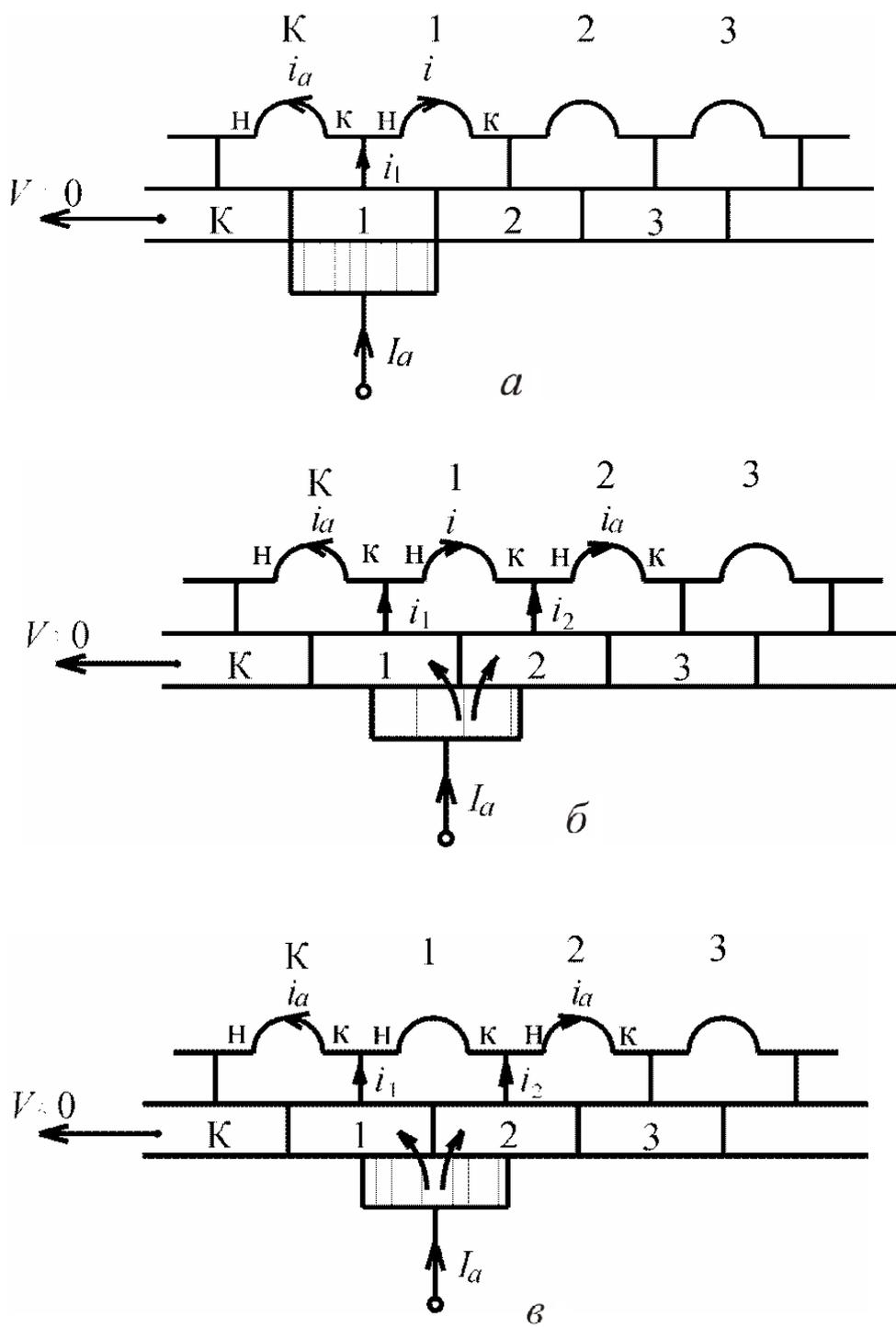


Рис. 6.21 (начало)

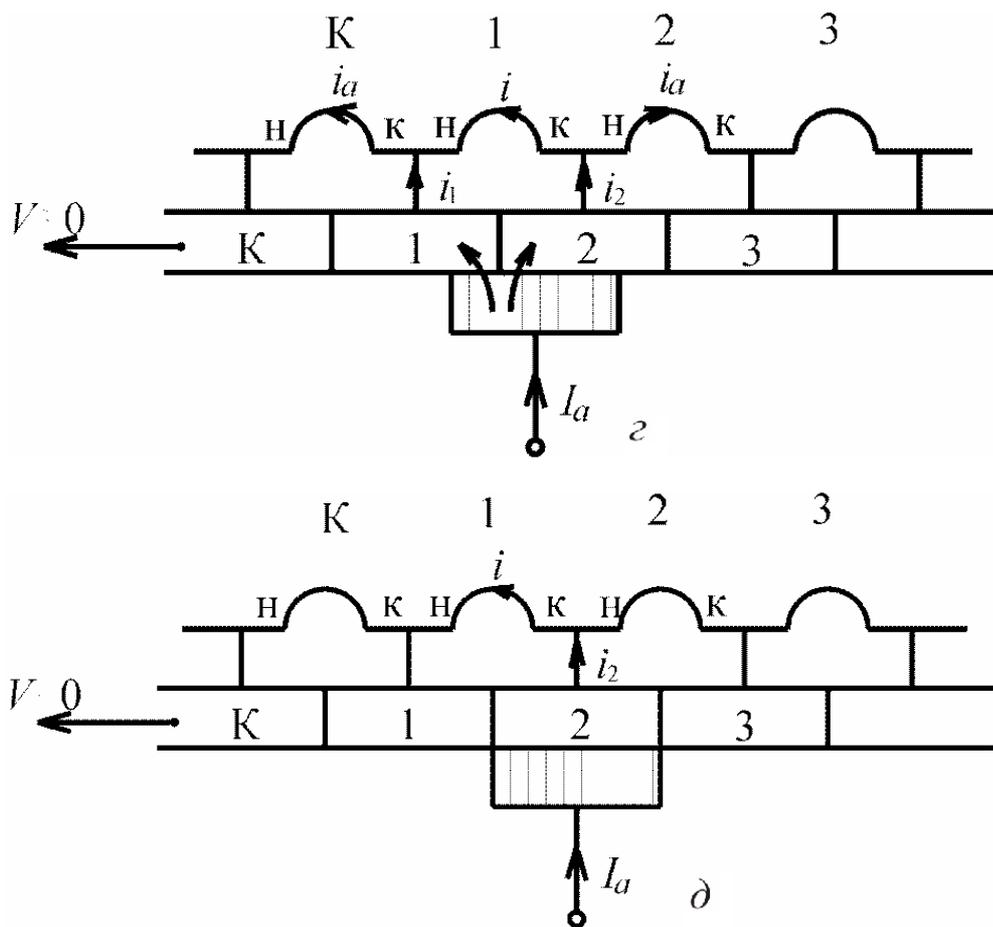


Рис. 6.21 (окончание)

$$a - t = 0; i_1 = I_a; i = i_a; \quad б - t = t_1; i_1 > i_2 \Rightarrow i \downarrow; i < i_a;$$

$$в - t = t_2; i_1 = i_2 = \frac{1}{2} I_a; i = 0; \quad г - t = t_3; i_2 > i_1; i < 0;$$

$$д - t = t_4 = T_k; i_1 = 0; i_2 = I_a; i = -i_a$$

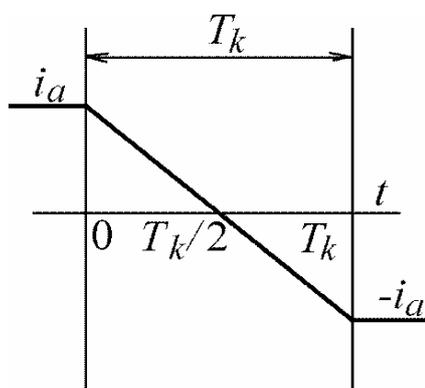


Рис. 6.22

Время переключения секции из одной параллельной ветви в другую параллельную ветвь называется временем коммутации  $T_k$ . Характер коммутации – прямолинейный. В этом случае происходит идеальная коммутация, при которой нет искрения.

**Компенсационная обмотка (полюсные обмотки)** [1, с. 108, 109; 2, с. 370, 371; 3, с. 170-172; 4, с. 499-501; 5, с. 99-103; 6, с. 51; 7, ч. 2, с. 224].

**Крепление щетки** – нетоковедущая часть электрической машины, предназначенная для крепления щеткодержателя и фиксируемая на коллекторе или контактном кольце посредством щеточной траверсы.

Щетки обеспечивают надежный электрический контакт только при соответствующем положении относительно контактной поверхности и давлении на нее. Для этой цели служит нажимной кронштейн, имеющий разное конструктивное исполнение в зависимости от мощности и типа машины. В маломощных машинах функции кронштейна выполняет обычная пружина. В мощных машинах нажимной кронштейн выполнен в виде подпружиненной пластины, закрепленной одним концом на оси. Другим концом пластина упирается в торец щетки. В этом случае обеспечивается оперативная замена щетки. Щеточные траверсы крепятся на подшипниковом щите. В общем случае щеточный узел состоит из нескольких комплектов щеток, распределенных по окружности коллектора.

**Круговой огонь на коллекторе** – дуговой разряд, возникающий по окружности коллектора между щетками разной полярности. Круговой огонь появляется при обрыве или коротком замыкании секций якорной обмотки, присоединенных к пластинам коллектора, при загрязнении последних, при нарушении механической прочности коллекторных пластин, а также при смещении щеток относительно **геометрической нейтрали**. Вероятность появления кругового огня увеличивается при отклонении геометрической формы коллектора от заданной, при снижении электрической прочности изоляции между коллекторными пластинами [1, с. 115; 2, с. 388; 3, с. 157, 158, 172, 173; 4, с. 498, 499; 5, с. 84-95; 6, с. 51-53; 7, ч. 2, с. 221, 222].

**Напряжение коммутации** – напряжение, возникающее в секциях обмотки якоря машины постоянного тока при переключении секции из одной параллельной ветви в другую. Напряжение коммутации возникает под действием различных факторов.

**Напряжение между пластинами коллектора** – напряжение, определяемое между соседними пластинами коллектора работающей машины постоянного тока. Оно не должно превышать  $15 \div 25\text{В}$ , по-

сколькx при более высоком напряжении резко повышается вероятность возникновения кругового огня на коллекторе [1, с. 108; 3, с. 155, 156; 4, с. 497, 498; 5, с. 96, 97; 6, с. 49, 50; 7, ч. 2, с. 222].

**Напряжение холостого хода** – напряжение на зажимах генератора постоянного тока при разомкнутой внешней цепи.

**Обмотка главных полюсов (см. полюсные обмотки).**

**Полюсные обмотки** – сосредоточенные или распределенные обмотки, подключаемые к источнику постоянного тока и используемые для создания потока возбуждения в электрических машинах постоянного тока.

В машинах постоянного тока полюсная обмотка располагается на массивных или шихтованных полюсах, устанавливаемых как на статоре, так и на роторе. В машинах постоянного тока, помимо главных полюсов, имеются дополнительные полюсы, ширина которых меньше ширины главных полюсов. На главных полюсах располагаются либо параллельная обмотка возбуждения с большим количеством витков и малым сечением провода, либо последовательная обмотка возбуждения с малым количеством витков и большим сечением провода, или одновременно обе указанные обмотки (при смешанном возбуждении).

Большинство МПТ с целью компенсации размагничивающего

влияния реакции якоря и падения напряжения на переходе «щетка – коллектор» снабжаются компенсационной или стабилизирующей обмоткой. Последняя размещается на главных полюсах МПТ (рис. 6.23) и включается последовательно в цепь якоря, так что созданный ею магнитный поток компенсирует размагничивающее влияние поперечной реакции якоря.

В двигателях постоянного тока, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, характеризующихся частыми пусками в ход, реверсами, возможными  $1,5 \div 2$  – кратными перегрузками по току, применяют еще одну обмотку, которую называют компенсационной обмоткой. Проводники этой обмотки разме-

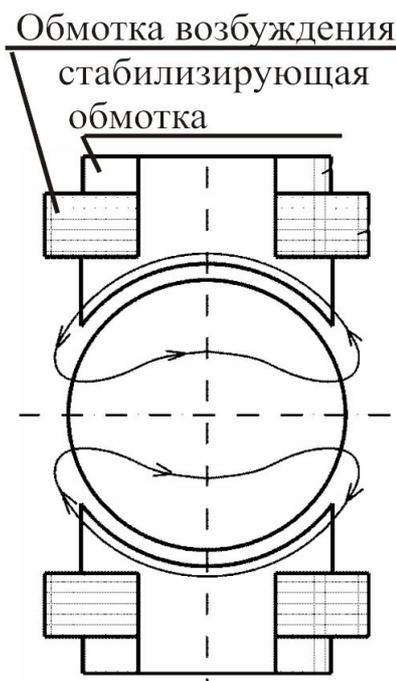


Рис. 6.23

щуют в пазах, выполненных в полюсных наконечниках. Включают эту обмотку последовательно в цепь якоря так, чтобы создаваемая ею магнитодвижущая сила и магнитное поле были направлены встречно МДС поперечной реакции якоря (рис. 6.24):  $F_{рез} = F_{aq} + F_{ок}$ .

Компенсационные обмотки используются в машинах постоянного тока относительно большой мощности и часто изготавливаются по типу **стержневых обмоток**, которые могут укладываться в пазы, выполненные на поверхности башмаков главных полюсов. Компенсационные обмотки позволяют улучшить процесс коммутации в щеточно-коллекторном узле. Благодаря этому снижаются **искрение** и **дугообразование** на коллекторе.

Нескомпенсированная МДС поперечной реакции якоря (рис. 6.24) нейтрализуется добавочными полюсами якоря. Они устанавливаются последовательно по линии геометрической нейтрали и имеют обмотку, которая включается в цепь якоря так, что создаваемое ими магнитное поле направлено встречно полю нескомпенсированной поперечной реакции якоря.

Обмотка дополнительных полюсов содержит небольшое количество витков провода с большим сечением.

**Поперечное поле якоря (см. реакция якоря).**

**Последовательность чередования полюсов** – порядок расположения главных и дополнительных полюсов на статоре машины постоянного тока. В двигателе постоянного тока по направлению вра-

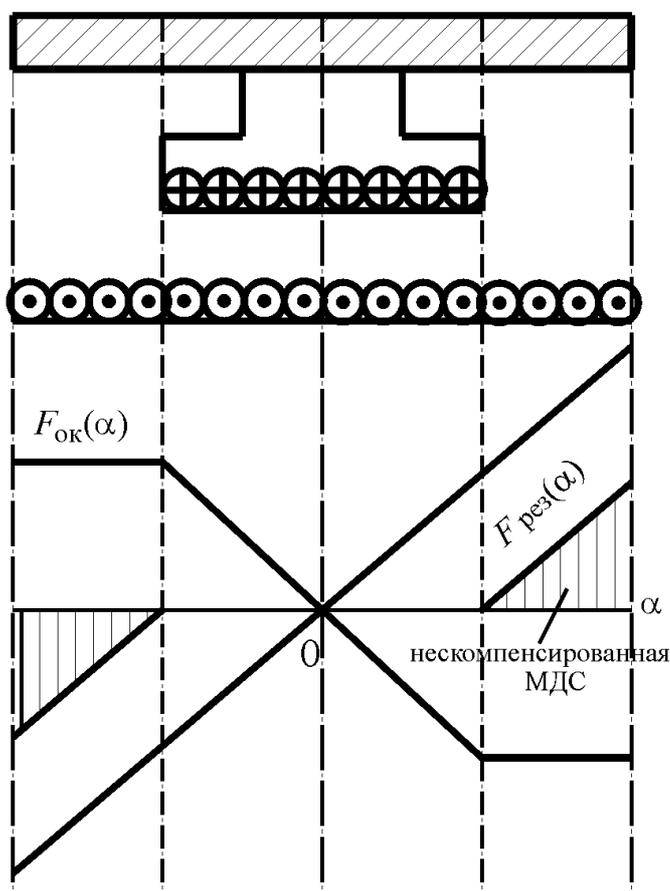


Рис. 6.24

щения якоря за главным полюсом следует одноименный (северный или южный) дополнительный полюс. В генераторах постоянного тока, наоборот, за главным полюсом следует добавочный полюс противоположной полярности [1, с. 130; 2, с. 386; 3, с. 164, 165; 4, с. 519, 520; 6, с. 63; 7, ч. 2, с. 222].

**Продольная реакция якоря** – реакция якоря электрической вращающейся машины, образуемая составляющей намагничивающей силы обмотки якоря, создающей магнитный поток, направленный по продольной оси полюсов [1, с. 101; 2, с. 367-369; 3, с. 164-166; 4, с. 495-497; 5, с. 82-84; 6, с. 42-44; 7, ч. 2, с. 220, 221].

**Прямолинейная коммутация.** Прямолинейная коммутация является «тёмной», т. е. протекает без искрения. Она возможна на практике только при бесконечно медленном вращении якоря [1, с. 118, 119; 2, с. 376-378; 4, с. 509, 510; 5, с. 112, 113; 7, ч. 2, с. 228-230].

Чтобы описать характер коммутации, построим график функции  $i(t)$  (рис. 6.25) по выражению

$$i(t) = i_{\text{осн}}(t) + i_{\text{доб}}(t), \text{ где } i_{\text{осн}} = \left(1 - \frac{2t}{T_k}\right) \cdot i_a \quad .$$

Подставляя различные значения времени, построим график прямолинейной коммутации:

$$t=0 \rightarrow i_{\text{осн}} = i_a;$$

$$t = \frac{1}{2} T_k \rightarrow i_{\text{осн}} = 0;$$

$$t = T_k \rightarrow i_{\text{осн}} = -i_a.$$

Углы  $\alpha_1 = \alpha_2$  имеют определенный физический смысл, а именно: они пропорциональны плотности тока (первый пропорционален току под сбегающим краем щетки и, соответственно, второй пропорционален току набегающего края щетки):

$$\text{tg } \alpha_2 = \frac{i_2}{t}, \text{ где } t = \frac{T_k}{S} \cdot S_2 \quad ,$$

где  $S$  – площадь рабочей поверхности щетки;  $S_2$  – площадь контакта щетки с 2-ой пластиной.

$$\text{Тогда } \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{S \cdot i_2}{T_k \cdot S_2} = \frac{S \cdot j_2}{T_k} \Rightarrow \alpha_2 \equiv j_2; \alpha_1 \equiv j_1, \text{ а так как } \alpha_1 = \alpha_2,$$

и  $j_1 = j_2$ .

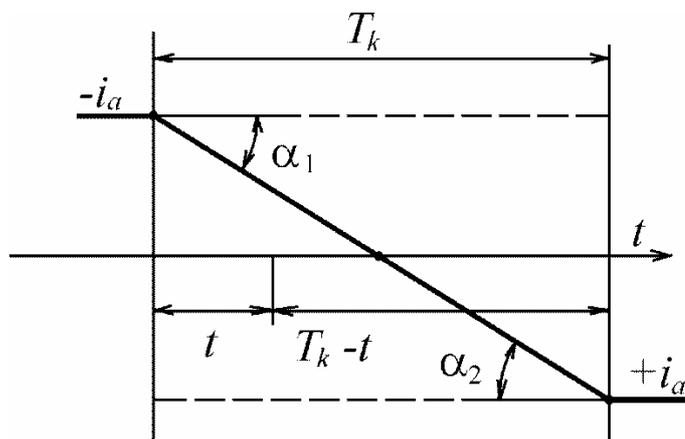


Рис. 6.25

**Распределение магнитного поля** – картина распределения силовых линий магнитного поля в конструкции, содержащей детали из ферромагнитных материалов и катушки с током. Во вращающихся электрических машинах такое распределение обычно представляет интерес для области с явно выраженными полюсами (рис. 6.26, а) и для области с пазами и уложенной в них обмоткой (рис. 6.26, б) [2, с. 364, 365; 3, с. 125; 7, ч. 2, с. 216, 217].

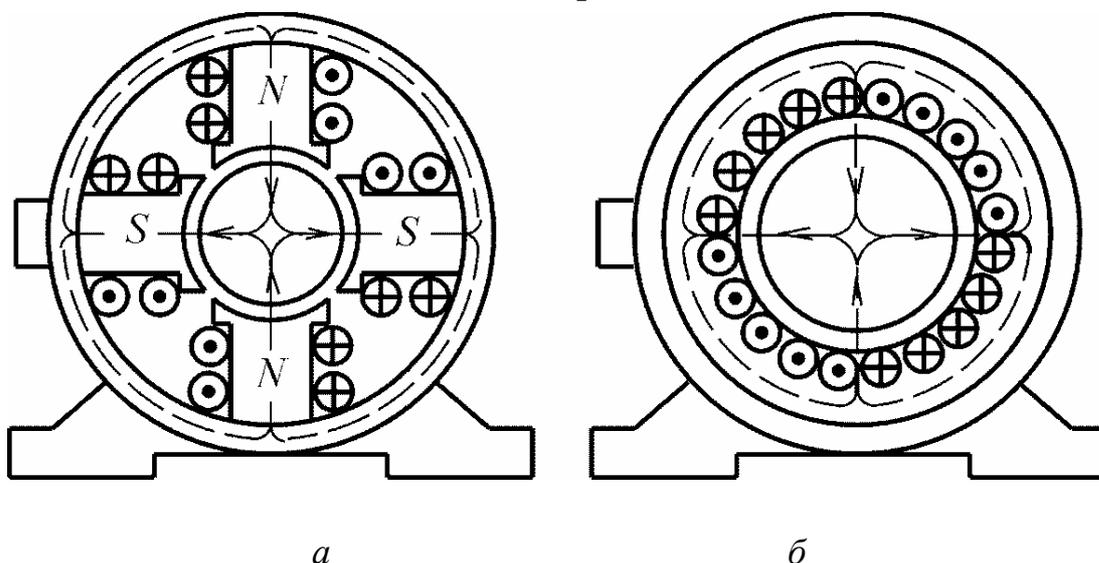


Рис. 6.26

**Реакция якоря** – воздействие намагничивающей силы обмотки якоря на поле электрической вращающейся машины, созданное обмоткой возбуждения или постоянными магнитами. Создаваемый главными полюсами магнитный поток ненагруженной машины постоянного тока расположен симметрично относительно указанных полюсов. При протекании тока нагрузки в обмотке якоря создается собственный магнитный поток, направленный перпендикулярно потоку возбуждения и не зависящий от направления вращения ротора.

В этом случае окружность якоря можно разбить на следующие 4 сектора: сектора 2 – 3, 1 – 4; сектора 1 – 2, 3 – 4 (рис. 6.27, а).

Токи секторов 2 – 3 и 1 – 4 создают поперечную реакцию якоря (рис. 6.27, б). Токи секторов 1 – 2, 3 – 4 создают продольную реакцию якоря (рис. 6.27, в), которая либо размагничивает, либо намагничивает главные полюса. Это зависит от направления смещения щеток с геометрической нейтрали.

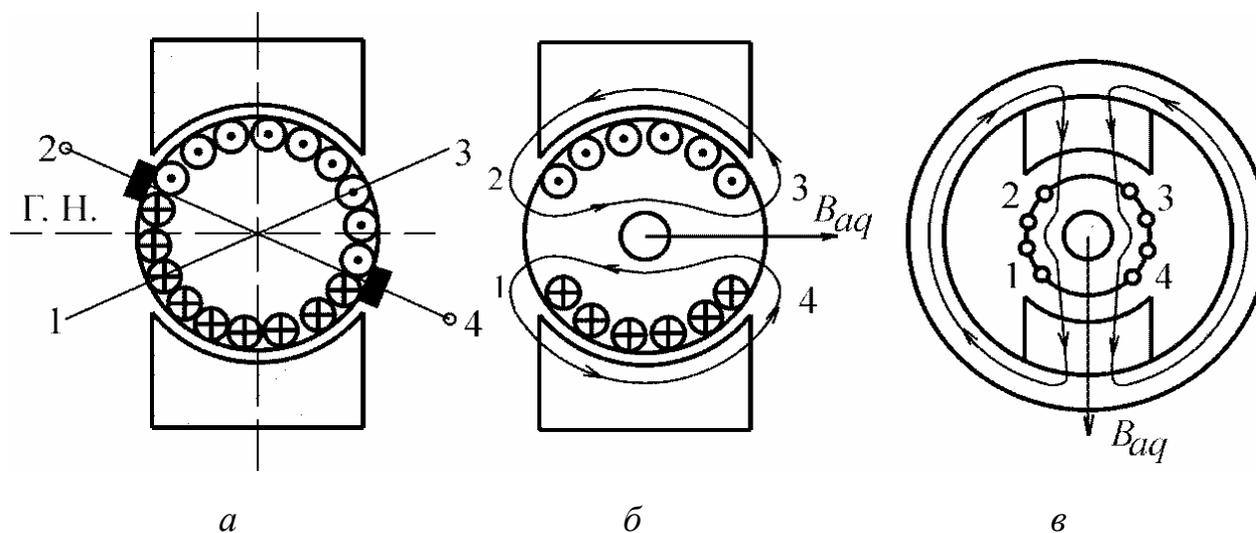


Рис. 6.27

Линии поля якоря замыкаются по тому же пути, что и основное магнитное поле. Этот путь обладает малым магнитным сопротивлением, и, следовательно, даже незначительное смещение щеток с нейтрали способствует созданию довольно интенсивного магнитного поля продольной реакции якоря, что тотчас же отразится на магнитных характеристиках машины.

Следствием взаимодействия указанных потоков является результирующий поток, ось геометрической нейтрали которого смещена на некоторый угол относительно оси геометрической нейтрали ненагруженной машины. В результате происходит изменение потока возбуждения машины. Реакция якоря приводит также к искрению под щетками и к снижению ЭДС, наводимой в обмотке якоря. Для устранения этих эффектов используется **компенсационная обмотка**, укладываемая в пазы главных полюсов или расположенная на дополнительных полюсах [1, с. 101, 102; 2, с. 364-366; 3, с. 128, 129; 4, с. 487; 7, ч. 2, с. 216-219].

**Самоиндукция** – электромагнитная индукция, вызванная изменением сцепляющегося с контуром магнитного потока, обусловленного электрическим током в этом контуре.

При подключении катушки к источнику питания через нее начинает протекать электрический ток, создающий магнитный поток, сцепляющийся с витками катушки. При изменении тока, а, следовательно, и потока в контуре наводится ЭДС самоиндукции, препятствующая изменению тока в контуре. Таким образом, ЭДС самоиндукции всегда направлена навстречу протекающему току и имеет знак минус:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \text{ [2, с. 378; 3, с. 146-148; 4, с. 512, 513; 6, с. 56; 7, ч. 2, с. 235].}$$

**Сосредоточенная обмотка** – обмотка явнополюсной электрической машины, выполненная в виде цилиндрической катушки, расположенной на полюсах.

Сосредоточенные обмотки используются в электрических машинах постоянного тока в качестве полюсных (рис. 6.28). Они крепятся на стержне магнитопровода посредством клея или удерживаются на своем месте с помощью полюсных башмаков.

**Способы улучшения коммутации** [1, с. 130-137; 2, с. 382-387; 3, с. 161-169; 4, с. 514-523; 6, с. 60-66; 7, ч. 2, с. 238-246].

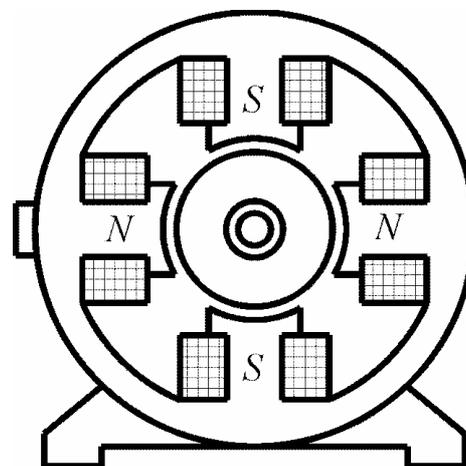


Рис. 6.28

Меры по улучшению коммутации сводятся к всемерному уменьшению добавочного тока коммутации  $i_{\text{доб}}$ , определяемого по формуле

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e}{R_k} = \frac{e_L + e_M}{r_{\text{щ}} \cdot \frac{T_k}{t} \cdot \frac{T_k}{T_k - t}}.$$

Если проанализировать формулу, то можно увидеть следующие способы улучшения коммутации:

- изготовление щетки из материала с большим переходным сопротивлением щеточного контакта  $r_{\text{щ}}$  и смещение щеток с **геометрической нейтральной** в сторону положения физической нейтральной (применяют в электрических микромашинах и в нереверсивных электрических машинах);

- уменьшение ЭДС самоиндукции  $e_L = -L \frac{di}{dt}$ , достигаемое за счет уменьшения числа витков секции ОЯ. Кроме того, паз машины делают мелким и широким, так как в этом случае сопротивление потоку будет максимальным и ЭДС самоиндукции уменьшится;

- ЭДС взаимной индукции  $e_M$  уменьшают, выбирая не очень широкие щетки, что приводит к уменьшению числа одновременно коммутируемых секций, а также применяя укорочение шага обмотки или ступенчатые обмотки и укладывая в пазы не более трех активных сторон секций.

Перечисленные меры приводят к усложнению технологии изготовления машины и, как следствие, к ее удорожанию.

Кардинально проблема улучшения коммутации решается введением в коммутируемый контур дополнительной ЭДС такой величины и полярности, чтобы практически нейтрализовать реактивную ЭДС и ЭДС от поля реакции якоря. В этом случае добавочный ток коммутации определяется следующим выражением:

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e - e_k}{r_{\text{щ}} \frac{T_k^2}{t(T_k - t)}}.$$

Обычно  $e_k$  обеспечивают несколько больше, чем  $\sum e$ , так что  $i_{\text{доб}}$  становится отрицательным. При чрезмерно большой  $e_k$  коммутация становится значительно **ускоренной** и возникает искрение на набегающем крае щеток.

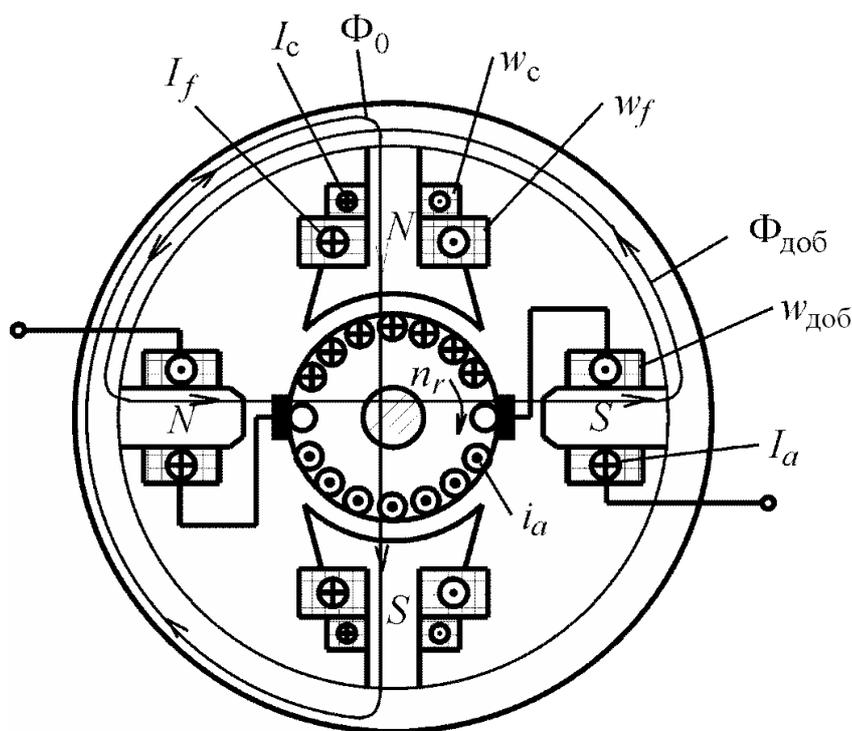


Рис. 6.29

Коммутируемая ЭДС вводится в контур коммутации при помощи магнитного поля так называемых дополнительных полюсов. Последние устанавливаются между главными полюсами с обмотками возбуждения  $w_f$  и стабилизирующей  $w_c$  (рис. 6.29), т. е. по геометрической

нейтрали. Обмотку дополнительных полюсов  $w_{\text{доб}}$  включают последовательно в цепь якоря, а полярность этих полюсов выбрана такой, чтобы  $e_k$  была направлена встречно по отношению к  $\sum e$  и ЭДС поля поперечной реакции якоря. Намагничивающую силу добавочного полюса выбирают по величине  $F_{\text{доб}} = (1,15 \div 1,25)F_{\text{як}}$ . Таким образом, применение добавочных полюсов – основной способ улучшения коммутации.

**Уравнение коммутации** – аналитическое уравнение, описывающее закон изменения тока коммутируемой секции [1, с. 116, 117; 3, с. 140-145; 4, с. 507-509; 5, с. 110-112; 6, с. 55-57; 7, ч. 2, с. 226-228].

Пусть  $S$  – площадь контакта щетки с коллектором;  $r_{\text{щ}}$  – сопротивление;  $t$  – время;  $T_k$  – период коммутации;  $S_2, r_2$  – площадь контакта

щетке с коллекторной пластиной 2 и сопротивление этого контакта;  $i_1, i_2$  – токи в соединительных проводах.

Контур, по которому замыкается ток коммутируемой секции, изображен на рис. 6.30.

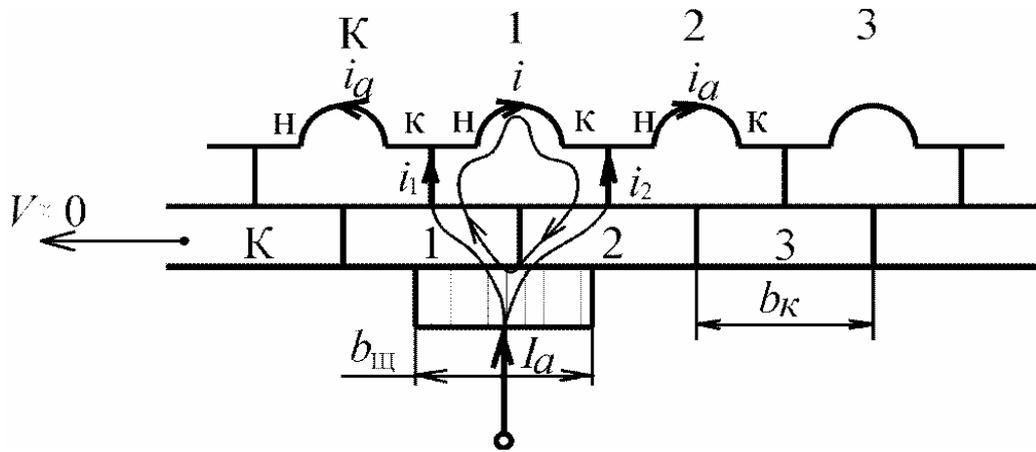


Рис. 6.30

Из рисунка видно, что ток коммутируемой секции протекает по следующему пути: секция 1 – сопротивление 2 – коллекторная пластина 2 – контактируемая поверхность  $S_2$  – щетка – контакт  $S_1$  – пластина 1 – соединительный провод 1 – секция 1.

Сопротивления, встречающиеся на этом пути:

$$r_c, r_{пр2}, R_{пл2}, r_2, R_{щ}, r_1, R_{пл1}, r_{пр1}.$$

На практике обычно

$$r_c + r_{пр2} + R_{пл2} + R_{щ} + R_{пл1} + r_{пр1} \ll r_1 + r_2.$$

С учетом этого составляются уравнения электрического равновесия для замкнутого контура:

$$\begin{cases} i_1 \cdot r_1 - i_2 \cdot r_2 = \Sigma e, \\ i_a + i = i_1, \\ i_a - i = i_2; \end{cases} \quad (6.1)$$

$$i = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} + \frac{\Sigma e}{r_2 + r_1}. \quad (6.2)$$

В вышеприведенных уравнениях сопротивления  $r_2$  и  $r_1$  являются сложными функциями времени и тока, протекающего через эти сопротивления (или плотности тока), поэтому уравнение (6.2) в общем виде неразрешимо, но разработана классическая теория коммутации, позволяющая аналитически решить уравнение коммутации при следующих допущениях: коллекторно–щеточный узел механически совершенен; сопротивление щеточного контакта распределяется обратно пропорционально площади контакта и не зависит от плотности тока под щеткой. С учетом этих допущений

$$\frac{r_2}{r} = \frac{S}{S_2} \Rightarrow r_2 = r \cdot \frac{S}{S_2} \Rightarrow r_1 = r \cdot \frac{S}{S_1}, \quad (6.3)$$

где

$$S_2 = \frac{S \cdot t}{T_k}; \quad S_1 = \frac{S \cdot (T_k - t)}{T_k}. \quad (6.4)$$

Подставляем (6.3) в (6.2) и, учитывая (6.4), получаем следующее выражение, которое называется уравнением коммутации:

$$i = \frac{\left(1 - \frac{2t}{T_k}\right) \cdot i_a + \frac{\Sigma e}{T_k^2}}{1} + \frac{r \cdot \frac{S}{t \cdot (T_k - t)}}{2}. \quad (6.5)$$

Из формулы (6.5) следует, что ток коммутируемой секции состоит из двух составляющих – основного тока коммутации 1 и добавочного тока коммутации 2.

**Ускоренная (замедленная) коммутация.** Процесс коммутации быстротечен, так как период коммутации  $T_k \approx 0,0025$  с и менее. Столь быстрое изменение тока в коммутируемой секции вызывает такое же быстрое изменение потокосцепления этой секции, что сопровождается индуцированием ЭДС в этой секции. В коммутируемой секции за время коммутации индуцируются ЭДС самоиндукции  $e_L$ ,

создаваемая током этой же секции, и ЭДС взаимной индукции  $e_M$  (индуцируется магнитным потоком от тока одной секции, одновременно коммутируемой с другой секцией).

Так как щетка, как правило, перекрывает не менее 2 (обычно 2÷3) коллекторных пластин, в состоянии коммутации находятся сразу несколько секций, активные стороны которых расположены рядом в пазу, поэтому реактивная ЭДС  $e_p = e_L + e_i$ .

В суммарную ЭДС входит также ЭДС от магнитного поля поперечной реакции якоря  $e_{aq}$ :

$$\sum e = e_L + e_i + e_{aq} = e_p + e_{aq}.$$

Построим график добавочного тока коммутации, определяемого выражением

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e}{r \cdot \frac{T_k^2}{t \cdot (T_k - t)}} = \frac{\sum e}{R_k}.$$

График  $i_{\text{доб}}(t)$  можно построить лишь в том случае, если принять допущение о постоянстве суммарной ЭДС за период коммутации  $\sum e = \text{const}$ .

Сопротивление коммутируемого контура определяется следующим выражением:

$$R_k = r \cdot \frac{T_k^2}{t \cdot (T_k - t)} \left. \begin{array}{l} \text{при } t=0 \quad R_k = \infty \Rightarrow i_{\text{доб}}=0 \\ \text{при } t=T_k \quad R_k = \infty \Rightarrow i_{\text{доб}}=0 \end{array} \right\} \quad (6.6)$$

Следовательно, существует момент времени  $t$ , при котором сопротивление коммутируемого контура минимальное, а добавочный ток коммутации максимален. Этот момент времени определяется, если приравнять производную  $R_k$  к нулю. В результате несложных вычислений получим

$$T_k - 2t = 0 \Rightarrow t = \frac{1}{2} T_k; \quad R_{k \text{ min}} = 4 \cdot r. \quad (6.7)$$

Построим график зависимости  $R_k(t)$  и график добавочного тока коммутации (рис. 6.31).

Складывая ординаты графиков прямолинейной коммутации и графика добавочного тока коммутации, получим график криволинейной коммутации (рис. 6.32). Зависимость  $i(t)$  отображает процесс криволинейной замедленной коммутации, а зависимость  $i_2(t)$  соответствует ускоренному характеру коммутации.

Замедление коммутации сопровождается искрением под сбегающим краем щетки, поскольку  $\alpha_1 \gg \alpha_2 \Rightarrow j_1 \gg j_2$  и ток в секции проходит через нуль во втором полупериоде коммутации. При криволинейной ускоренной коммутации искрить начинает набегающий край щетки [1, с. 119-121; 2, с. 378-381; 4, с. 510-512; 5, с. 113, 114; 6, с. 55-57; 7, ч. 2, с. 231-234].

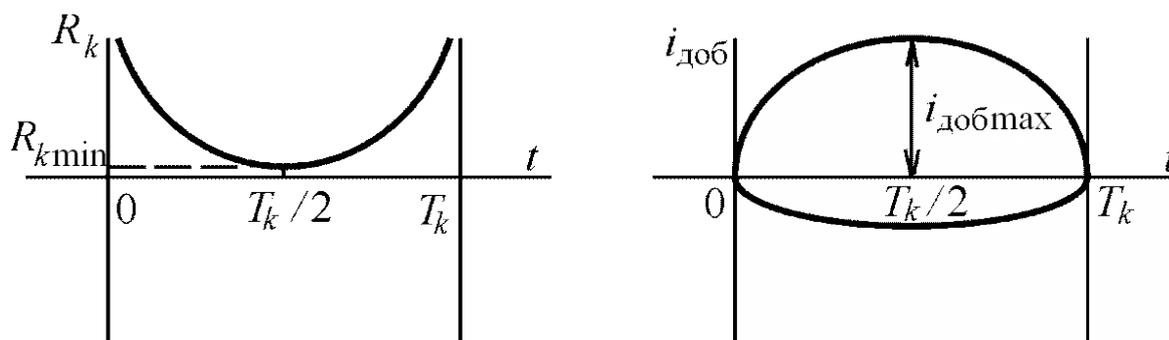


Рис. 6.31

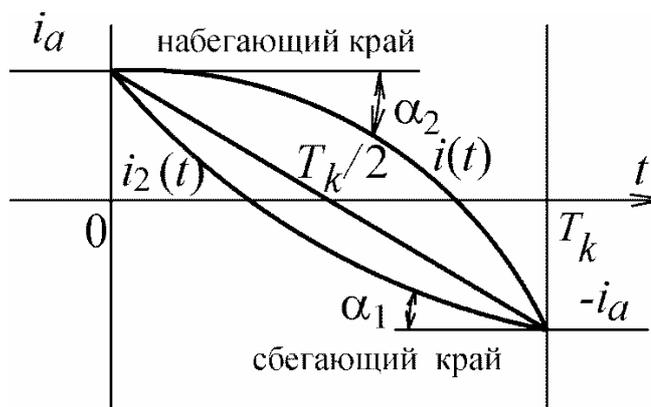


Рис. 6.32

**Знания по данной теме применяются** в решении производственных задач. Необходимо знать ответы, например, на такие вопросы.

1. Назовите последствия неверной установки щеток.
2. Опишите подробно в рабочей тетради, как будет работать машина постоянного тока, если расстояние по окружности коллектора между щетками неравномерно.
3. Что влияет на ухудшение коммутации, если щетки в плохом состоянии и неправильно установлены в щеткодержателях? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.
4. Опишите процесс коммутации, если щетки слабо прилегают к коллектору или слишком сильно прижаты к нему. Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.
5. Что произойдет, если в машине использованы щетки разных марок (это нередко случается при замене износившихся щеток)? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.
6. Что произойдет, если нажатие на щетки неодинаково (ток между ними распределяется неравномерно)? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.
7. Что произойдет, если главные и добавочные полюсы чередуются неправильно? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.
8. Что произойдет, если зазор между якорем и отдельными или всеми добавочными полюсами не соответствует зазору, указанному в паспорте машины? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.
9. Опишите подробно в рабочей тетради процесс, происходящий при междувитковом соединении или коротком замыкании в одной или в нескольких катушках главных полюсов.
10. Из-за плохой центровки якоря при монтаже машины или вследствие выработки подшипниковых вкладышей зазор между якорем и полюсами неравномерен. Опишите подробно в рабочей тетради процесс в МПТ при неравномерном зазоре между якорем и полюсами.
11. Щетки в ДПТ стоят не на геометрической нейтрали. Что произойдет при реверсе ДПТ? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

12. Что произойдет, если для реверсивной работы применить двигатель без добавочных полюсов? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

13. Что произойдет при неправильном соединении одной или нескольких катушек главных полюсов? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

14. Что произойдет при междувитковом соединении в одной или нескольких катушках главных полюсов? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

### **КРАТКИЕ ОТВЕТЫ – ПОДСКАЗКИ**

1 – 6. Искрят все щетки или часть их. Искрение сопровождается повышенным нагревом коллектора и щеток (к вопросам 1 – 6).

7. Машина начинает искрить при частичной нагрузке. При холостом ходе машина не искрит. По мере возрастания нагрузки искрение увеличивается и достигает в некоторых случаях недопустимой величины.

8. Щетки равномерно искрят при нагрузке. При холостом ходе машина не искрит. Если искрение исчезает или уменьшается при передвижении щеток против направления вращения у генератора и по направлению вращения у двигателя, то добавочные полюсы слишком сильны; если же искрение в этих случаях усиливается, то добавочные полюсы слишком слабы. Если добавочные полюсы слабы, то нужно зазор уменьшить; если же они сильны, то его надо увеличить.

9. Искажение магнитного поля вызывает появление уравнивающих токов в якоре, повышенный нагрев якоря, неравномерное нагревание отдельных катушек главных полюсов. Щетки искрят, хотя щеточный аппарат в порядке, щетки установлены правильно, коллектор чист и изоляция между коллекторными пластинами не выступает.

10. Неравномерность зазора между якорем и полюсами приводит к тому, что магнитное поле становится неоднородным и в отдельных ветвях обмотки якоря индуцируются различные электродвижущие силы, вследствие чего возникают внутренние уравнивающие токи.

При значительной неравномерности зазоров уравнивающие токи (особенно в машинах с небольшим числом уравнивающих соединений) служат причиной сильного нагревания якоря и искрения щеток. Якорь сильно нагревается даже у ненагруженной машины, и щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов.

11 – 12. При вращении двигателя в одном направлении щетки искрят сильнее, чем при вращении в другом направлении; наблюдается постоянная склонность к искрению при вращении двигателя в каком-либо направлении; двигатель вращается в одном направлении быстрее, чем в другом.

13. Это создает ненормальное магнитное поле и вызывает появление уравнивающих токов в якоре. Щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов. Генератор дает номинальное напряжение только при повышенной частоте вращения. Двигатель при номинальном напряжении и правильном сопротивлении регулировочного реостата вращается слишком быстро. Катушки полюсов нагреваются равномерно.

14. Искажается магнитное поле. Щетки одного полюса искрят сильнее щеток других полюсов. Генератор дает номинальное напряжение только при повышенной частоте вращения. Двигатель при номинальном напряжении и правильном сопротивлении регулировочного реостата вращается слишком быстро. Катушки полюсов нагреваются неравномерно.

## **6.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ**

По данным, приведенным в табл. 6.1, 6.2, определить для номинальной нагрузки машин влияние реакции якоря при расположении щеток на геометрической нейтрали (все варианты); при сдвиге щеток с нейтрали в сторону вращения якоря на одно коллекторное деление (варианты с 1 по 60); при сдвиге щеток с нейтрали против вращения якоря на одно коллекторное деление (варианты с 61 по 120).

Оценка влияния реакции якоря на ЭДС машины производится с помощью графика зависимости  $E_a=f(F_a)$ , приведенного на рис. 6.33.

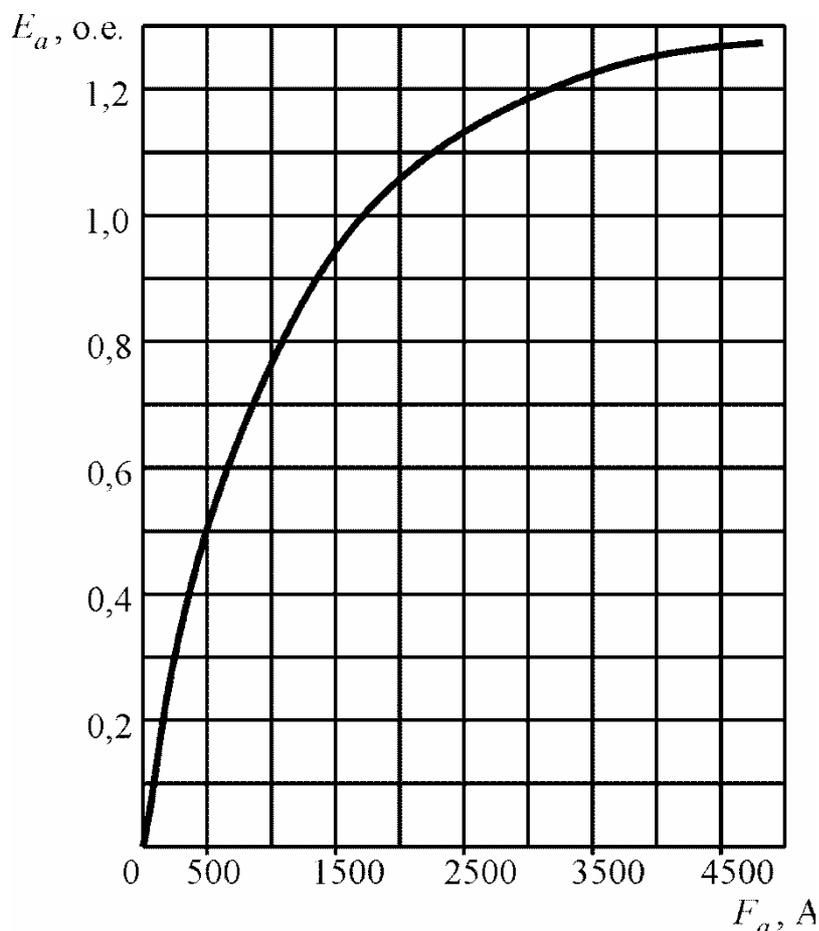


Рис. 6.33

Таблица 6.1

Величины	Коэффициент расчета номера варианта $K_{В1}$					
	0	1	2	3	4	5
Номинальная мощность, кВт	13,3	4540	23	500	14	300
Напряжение, В	230	750	230	460	220	230
Номинальный ток якоря, А	58	6240	103	1100	71	1320
Сопrotивление цепи якоря, Ом	0,465	0,003	0,197	0,0094	0,205	0,0064
Частота вращения, об/мин	1460	50	970	375	1000	140
Число полюсов	4	24	4	8	4	8
Наружный/внутренний диаметр якоря, мм	245	3600	280	990	245	1400
	60	---	70	---	50	---
Длина якоря, мм	80	1310	140	340	125	320
Число проводников ОЯ	834	2232	500	460	558	960

Число параллельных ветвей $2a$	2	24	2	4	2	8
Коэффициент полюсной дуги	0,65	0,7	0,7	0,65	0,65	0,7

Окончание табл. 6.1

Величины	Коэффициент расчета номера варианта $K_{B1}$					
	0	1	2	3	4	5
Число пазов	35	372	48	115	31	120
Ширина паза, мм	8,5	13,8	10,6	11	9,6	16
Высота паза и зубца, мм	36,2	53,5	36,2	40	30	50
Воздушный зазор, мм	1,5	8	3	5	2,2	10
Осевая длина полюса, мм	80	1320	---	340	125	310
Ширина полюса, мм	80	260	---	200	80	240
Сечение полюса, мм <sup>2</sup>	---	---	12500	---	---	---
Высота полюса, мм	70	280	110	175	90	300
Сечение станины, мм <sup>2</sup>	4150	188500	7500	41200	5300	73000
Высота станины, мм	26	135	50	75	25	120
Коэффициент рассеяния	1,25	1,15	1,25	1,2	1,25	1,15
Число вентиляционных каналов	---	22	---	4	---	3

Исходные данные задачи выбираются с помощью табл. 6.2 по номеру  $N_B$ , который студент узнает у преподавателя. При этом номер варианта (для вариантов с 1 по 60) рассчитывается по формуле  $N_B = K_{B2} + (K_{B1} \cdot 10)$ . 61-й вариант соответствует первому, 62-ой вариант соответствует второму и т.п.

Следовательно, если заданы, например, 57-ой или 117 варианты, то  $K_{B1} = 5$ , а  $K_{B2} = 7$ .

Таблица 6.2

Варианты задания	Генератор					Двигатель				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент расчета номера варианта $K_{B2}$										
Число коллекторных пластин	139	48 0	125	23 0	93	13 9	480	125	230	93

## Глава 7. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 7.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕМЫ

1. Назначение и область применения генераторов постоянного тока.
2. Номинальные параметры генератора постоянного тока.
3. Особенности конструкции генераторов постоянного тока.
4. Способы создания магнитного поля генераторов постоянного тока.
5. Энергетическая диаграмма генераторов постоянного тока.
6. Характеристика холостого хода генераторов постоянного тока с различными способами возбуждения.
7. Нагрузочные характеристики генераторов.
8. Внешние характеристики генераторов постоянного тока.
9. Регулировочные характеристики генераторов постоянного тока.
10. Способы регулирования выходного напряжения генераторов с независимым и параллельным возбуждением.
11. Выходное напряжение генераторов с последовательным возбуждением.
12. Условия параллельной работы генераторов постоянного тока.
13. Сравнительный анализ внешних характеристик генераторов с различными способами создания магнитного потока.
14. Условия самовозбуждения генераторов постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Авторы считают, что добросовестно работавшие над предыдущими главами студенты приобрели навыки работы с книгами из библиографического списка. Поэтому в излагаемом далее учебном материале отсутствуют ссылки – путеводитель по этим книгам. Заинтересованные в высоком качестве своего обучения студенты могут составить его самостоятельно. Материалом, который излагается в двух последующих главах, студенты могут пользоваться также при подготовке к выполнению лабораторных работ по генераторам и двигателям постоянного тока.

## **7.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ**

В результате изучения темы студенты должны  
**ПОМНИТЬ:**

– назначение и область применения генераторов постоянного тока (ГПТ); алгоритм введения генератора постоянного тока независимо возбуждения в работу; основные физические законы, позволяющие преобразовывать механическую энергию в электрическую энергию постоянного тока, составляющие уравнений механического и электрического равновесия ГПТ и соотношения между ними; составляющие потерь в ГПТ; основные характеристики генераторов с различными способами возбуждения и их определение; условия самовозбуждения ГПТ параллельного возбуждения;

#### ОБЪЯСНЯТЬ:

– принцип действия генератора постоянного тока; причины изменения напряжения на выходе генератора при изменении тока нагрузки; физические явления в генераторе, приводящие к потерям потребленной от приводного механизма механической энергии; процесс самовозбуждения генераторов, имеющих параллельную обмотку возбуждения; процесс самовозбуждения генераторов с последовательной обмоткой возбуждения; отличия в характеристиках генераторов независимого, параллельного и смешанного возбуждения;

#### УМЕТЬ:

– выбирать генератор по паспортным параметрам для использования в конкретных условиях эксплуатации; собирать схему и проводить испытания генератора с целью определения его реальных параметров; строить характеристический треугольник; находить по регулировочной характеристике номинальное изменение тока возбуждения; определять по внешней характеристике номинальное падение напряжения генератора; определять критическое значение сопротивления цепи возбуждения; выявлять причины отклонения от нормального режима работы и определять пути устранения этих причин.

Вы также должны ответить, например, на следующие вопросы:

1. Что такое номинальные параметры генератора постоянного тока?
2. Какой вид имеет уравнение электрического равновесия генератора, работающего под нагрузкой?

3. От чего зависит величина напряжения на зажимах генератора при холостом ходе?

4. Почему при увеличении тока нагрузки генератора с независимым возбуждением напряжение на его зажимах уменьшается?

5. О чем говорит тот факт, что при увеличении тока нагрузки генератора со смешанным возбуждением напряжение на выходе машины резко уменьшается при токах, которые меньше номинального?

6. Почему у генератора с последовательным возбуждением, работающего в режиме, близком к режиму холостого хода, напряжение на выходе в десятки раз меньше номинального значения?

7. Как увеличить напряжение на зажимах генератора с независимым возбуждением, если обмотка возбуждения генератора подключена к источнику питания без регулировочного реостата?

8. Как изменить полярность напряжения на зажимах генератора, если вследствие конструктивных особенностей невозможно поменять местами провода на клеммной колодке?

9. Какое оборудование необходимо иметь для полных испытаний генератора постоянного тока?

10. О чем говорит тот факт, что напряжение на выходе генератора с параллельным возбуждением при подключенной к выходу генератора обмотке возбуждения практически равно нулю?

11. Как по характеристике холостого хода определить величину остаточного магнитного потока генератора?

12. Как получить так называемый остаточный магнитный поток генератора постоянного тока, если магнитопровод машины был по каким-либо причинам размагничен?

13. Какие минимальные испытания генератора постоянного тока необходимо выполнить, чтобы получить основные характеристики генератора?

14. В чем причины различия внешних характеристик генератора при независимом, параллельном и смешанном возбуждении?

15. Почему машину постоянного тока проектируют таким образом, чтобы она имела максимальное значение КПД при нагрузке меньше номинальной на  $\sim 25\%$ ?

16. Почему мощность, потребляемая генератором, работающим в режиме холостого хода, не равна нулю?

17. Что является причиной увеличения искрения на коллекторе генератора постоянного тока при увеличении нагрузки?

18. Какими параметрами должны обладать генераторы постоянного тока и как настроить параллельно включенные генераторы на то, чтобы при изменении нагрузки ток распределялся пропорционально их номинальным мощностям?

19. Когда применяется генератор со встречно-смешанным возбуждением?

### 7.3. ЗАДАНИЯ ПО РАБОТЕ С КНИГОЙ

Исходные данные задания определяются с помощью табл. 4.1 по номеру  $N_B$ , который студент узнает у преподавателя. При этом номера учебных пособий, указанных в табл. 4.1, соответствуют номерам источников, приведенных в списке рекомендованной литературы. Все задания выполняются в рабочей тетради студента и предъявляются преподавателю для проверки.

1. Студенты, получившие варианты задания с 1 по 35, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для первого вопроса **главы 7** и двенадцатого вопроса **главы 7**, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для второго вопроса **главы 7** и десятого вопроса **главы 7**.

Студенты, получившие варианты задания с 36 по 70, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для третьего вопроса **главы 7** и девятого вопроса **главы 7**, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для шестого вопроса **главы 7** и восьмого вопроса **главы 7**.

2. Необходимо изложить в рабочей тетради основные мысли текста из книг, относящихся к вашему варианту (по образцу табл. 4.2).

### 7.4. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

**Задача 7.1.** Генератор постоянного тока (рис. 7.1) с параллельным возбуждением, номинальное напряжение которого  $U_H = 220$  В.

Номинальный ток возбуждения  $I_{fH} = 1,1$  А. Номинальная частота вращения  $n_{ном} = 1025$  об/мин, сопротивление цепи якоря  $R_a = 1$  Ом, сопротивление обмотки возбуждения  $R_f = 180$  Ом.

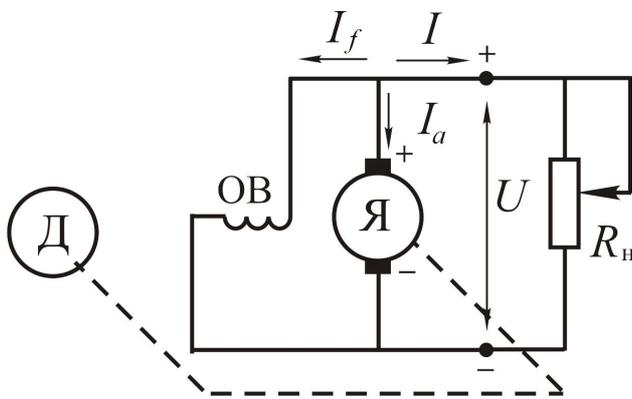


Рис. 7.1

При работе машины в генераторном режиме получена характеристика холостого хода  $E = f(I_f)$ , представленная в табл. 7.1.

Необходимо:

- определить критическое сопротивление цепи возбуждения;
- определить полное сопротивление регулировочного реостата цепи возбуждения;
- вычислить сопротивление реостата возбуждения в номинальном режиме работы генератора;
- определить напряжение на зажимах генератора при частоте вращения  $n = 0,5n_{ном}$  и  $I = I_H$ ;
- определить приращение тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия реакции якоря при номинальном токе якоря  $\Delta I_f$ ;
- построить внешнюю и регулировочную характеристику генератора;
- построить нагрузочную характеристику генератора.

Таблица 7.1

$E, В$	0	79,2	145,2	195,8	235,4	264	281,6	297	305,8	312,4	314,6
$I_f, А$	0	0,244	0,488	0,732	0,976	1,22	1,464	1,708	1,952	2,196	2,44

*Решение.*

1) Определить критическое сопротивление цепи возбуждения.

Критическое сопротивление цепи возбуждения пропорционально тангенсу угла наклона характеристики холостого хода на начальном участке. На первом отрезке характеристики холостого хода (табл. 7.1), ограниченном током возбуждения, равным нулю, и током возбуждения, равным 0,244 А, отношение приращения ЭДС к прираще-

нию тока возбуждения равно критическому сопротивлению цепи возбуждения:  $R_{кр} = 79,2/0,244 = 323 \text{ Ом}$ .

2) Определить полное сопротивление регулировочного реостата цепи возбуждения.

Сопротивление регулировочного реостата цепи обмотки возбуждения равно разности критического сопротивления и сопротивления обмотки возбуждения:  $R_{pf} = R_{кр} - R_f = 323 - 180 = 143 \text{ Ом}$ .

3) Вычислить сопротивление реостата возбуждения в номинальном режиме работы генератора.

При работе генератора в номинальном режиме сопротивление возбуждения равно отношению номинального напряжения к номинальному току возбуждения, следовательно,  $R_{fn} = U_n / I_{fn} = 220/1,1 = 200 \text{ Ом}$ . Сопротивление регулировочного реостата при этом равно  $R_{pfn} = R_{fn} - R_f = 200 - 180 = 20 \text{ Ом}$ .

4) Определить напряжение на зажимах генератора при частоте вращения  $n = 0,5 n_{ном}$  и  $I = I_n$ .

При работе генератора в номинальном режиме напряжение на выходе генератора равно разности ЭДС генератора и падения напряжения на сопротивлении цепи якоря. ЭДС обмотки якоря нагруженного генератора будет меньше, чем ЭДС генератора, работающего в режиме холостого хода при номинальном токе возбуждения. Разность ЭДС обусловлена размагничивающим действием реакции якоря. Принято считать, что размагничивающее действие реакции якоря пропорционально току якоря.

ЭДС обмотки якоря генератора, работающего в номинальном режиме:  $E_n = U_n + R_a I_{ан}$ ,

где  $I_{ан} = I_n + I_{fn}$ .

Номинальный ток генератора равен отношению номинальной мощности к номинальному току:

$$I_n = P_n / U_n = 3300/220 = 15 \text{ А}.$$

Ток якоря и ЭДС генератора, работающего в номинальном режиме,

$$I_{aH} = I_H + I_{fH} = 15 + 1,1 = 16,1 \text{ А}; E_H = U_H + R_a I_{aH} = 220 + 1 \cdot 16,1 = 236,1 \text{ В.}$$

Найденное реальное значение электродвижущей силы учитывает размагничивающее действие реакции якоря.

При уменьшении скорости вращения якоря в два раза при сохранении тока якоря ЭДС уменьшится в два раза и примет значение  $E'_H = 118 \text{ В}$ . Напряжение на выходе генератора  $U' = E'_H - R_a I_H = 118 - 1 \cdot 16,1 = 101,9 \text{ В}$ .

5) Определить приращение тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия реакции якоря при номинальном токе якоря  $\Delta I_f$ .

При номинальном токе якоря это приращение определяется разностью номинального тока возбуждения и тока возбуждения, при котором реальная ЭДС обмотки якоря равна ЭДС, определенной по характеристике холостого хода (табл. 7.1).

ЭДС обмотки якоря генератора, работающего в номинальном режиме,  
 $E_H = U_H + R_a I_{aH} = 220 + 1 \cdot 16,1 = 236,1 \text{ В}$ .

Ток возбуждения, соответствующий этой ЭДС и определяемый по табл. 7.1,  $I'_{fH} = 0,983$ . Номинальный ток возбуждения по условию задачи  $I_{fH} = 1,1 \text{ А}$ .

Тогда приращение тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия реакции якоря при номинальном токе якоря  $\Delta I_{fH} = I_{fH} - I'_{fH} = 1,1 - 0,983 = 0,117 \text{ А}$ .

6) Построить внешнюю и регулировочную характеристику генератора.

Внешней характеристикой является зависимость напряжений на якоре генератора от тока нагрузки  $U = f(I_a)$  при постоянной частоте вращения и неизменном токе возбуждения  $I_f = I_{f1} = const$ .

При построении внешней характеристики используется уравнение электрического равновесия:

$$U = C_e \cdot n \cdot \Phi_\delta - I_a \cdot R_a - \Delta U_{щ}$$

По этой характеристике определяют номинальное относительное изменение напряжения:  $\Delta U_H^* = \frac{U_0 - U_H}{U_H}$ . Уменьшение напряжения происходит вследствие падения напряжения в обмотке якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

Внешняя характеристика генератора может быть построена графическим методом путем использования характеристического треугольника. Она также может быть построена аналитическим методом на основании предположений о том, что падение напряжения на сопротивлении цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря пропорциональны току якоря.

Результаты расчета приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

$I$	15	12,5	10	7,5	5	2,5	0
$I_a$	16,1	13,6	11,1	8,6	6,1	3,6	1,1
$\Delta I_f$	0,117	0,0988	0,0806	0,0624	0,044	0,0261	0,006
$I'_f$	0,983	1,0012	1,02	1,0376	1,056	1,0739	1,095
$E_p$	236	238,6	241,2	243,5	246	248	250,5
$R_a I_a$	16,1	13,6	11,1	8,6	6,1	3,6	1,1
$U$	220	225	230	234,9	240	244,4	249,4

В таблице приняты следующие обозначения:

$I$  – ток нагрузки генератора;

$I_a = I + I_{fH}$  – ток цепи якоря. Ток возбуждения при этом считается величиной постоянной, не зависящей от изменения выходного напряжения;

$\Delta I_f$  – приращение тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия реакции якоря, значения которого пропорциональны току якоря, а номинальное значение рассчитано в предыдущем пункте;

$I'_f$  – ток возбуждения, при котором реальное значение ЭДС равняется ЭДС, определенной по характеристике холостого хода генератора при определенном значении тока;

$E_p$  – реальное значение ЭДС обмотки якоря;

$R_a I_a$  – падение напряжения на сопротивлении цепи якоря;

$U$  – выходное напряжение генератора, определяемое разностью реального значения ЭДС якоря и падения напряжения на сопротивлении цепи якоря.

Внешняя характеристика генератора представлена на рис. 7.2.

Регулировочная характеристика выражает зависимость тока возбуждения от тока якоря при неизменном напряжении на выходе генератора и постоянной частоте вращения  $I_f = f(I_a)$ , при  $U = U_1 = const$ .

Она показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не менялось.

Эта характеристика строится с использованием уравнения электрического равновесия:

$$U = C_e \cdot n \cdot \Phi_0 - I_a \cdot R_a - \Delta U_{щ} = const.$$

По этой характеристике определяют относительное изменение тока возбуждения при изменении тока нагрузки от холостого хода до номинального режима:

$$\Delta I_{fH}^* = \frac{I_{fH} - I_{f0}}{I_{f0}}.$$

Регулировочная характеристика строится в следующей последовательности:

– Определяются все значения величин, представленных в первом столбце табл. 7.3 для номинального режима работы.

– Выбираются произвольно значения силы тока якоря. Последнее значение тока якоря определяется с учетом того, что в режиме холостого хода ток якоря равен току возбуждения.

– Вычисляются падения напряжения на сопротивлении цепи якоря.

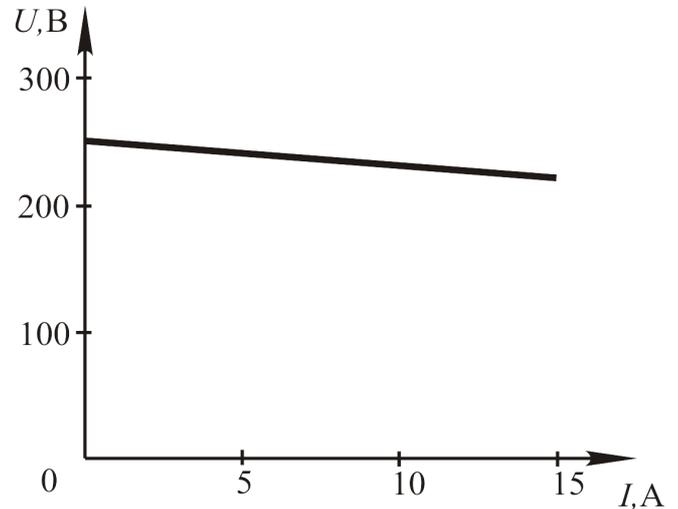


Рис. 7.2

- Вычисляются значения реальной ЭДС обмотки якоря.
- По характеристике холостого хода определяются значения токов возбуждения, соответствующие реальным значениям ЭДС.
- По приращению тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия реакции якоря в номинальном режиме вычисляются аналогичные величины для других токов. Учитывается пропорциональность реакции якоря приращению тока возбуждения.
- Вычисляется реальный ток возбуждения.
- Ток нагрузки определяется разностью тока якоря и тока возбуждения.

Таблица 7.3

$I_a$	16,1	15	12,5	10	7,5	5	2,5	0,883
$R_a I_a$	16,1	15	12,5	10	7,5	5	2,5	0,883
$E_p$	236	235	232,5	230	227,5	225	222,5	220,8
$I'_f$	0,983	0,976	0,961	0,945	0,93	0,914	0,898	0,883
$\Delta I_f$	0,117	0,1089	0,0907	0,0726	0,0544	0,0363	0,0145	0,006
$I_f$	1,1	1,085	1,052	1,017	0,984	0,95	0,912	0,883
$I$	15	13,9	11,45	8,983	6,516	4,1	1,585	0

Регулировочная характеристика представлена на рис. 7.3.

7) Определить характеристический треугольник и построить нагрузочную характеристику генератора.

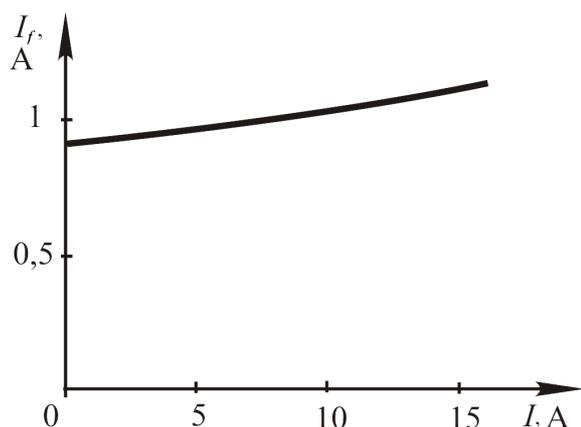


Рис. 7.3

Обычно нагрузочная характеристика строится в одной системе координат с характеристикой холостого хода (рис. 7.4). Стороны характеристического треугольника уже определены в предыдущих расчетах.  $\Delta I_{fn} = 0,117$  и  $R_a I_a = 16,1$  В.

Влиянием изменения тока якоря при изменении тока возбуждения пренебрегаем.  $I'_f = I_f + \Delta I_{fn}$  – ток возбуждения, при котором реальная ЭДС нагруженного генератора равна ЭДС холостого хода при токе возбуждения  $I_f$ . Напряжение на выходе генератора определится раз-

ностью реальной ЭДС и падения напряжения на сопротивлении цепи якоря. Результаты расчетов сведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

$E, В$	0	79,2	145,2	195,8	235,4	264	281,6	297	305,8	312,4	314,6
$I_f, А$	0	0,244	0,488	0,732	0,976	1,22	1,464	1,708	1,952	2,196	2,44
$I'_f, А$	-	0,361	0,605	0,847	1,093	1,337	1,581	1,825	2,069	2,313	2,557
$U$	-	63,1	129,1	179,7	219,4	247,9	265,6	281	289,7	296,3	298,5

**Задача 7.2.** При номинальной нагрузке генератор постоянного тока (рис. 7.1) с параллельным возбуждением, номинальное напряжение которого  $U_H = 220 В$ , развивает мощность 3300 Вт, сопротивление обмотки возбуждения  $R_f = 200 Ом$ , в режиме холостого хода ток якоря равен  $I_{a0} = 2,25 А$ . Номинальный ток возбуждения  $I_{fH} = 1,1 А$ , характеристика холостого хода  $E = f(I_f)$  представлена в табл. 7.1. Номинальная частота вращения  $n_{ном} = 1025 об/мин$ . Вычислить КПД генератора и механический момент на валу в номинальном режиме работы, построить график зависимости  $\eta(I)$ . Влиянием тока возбуждения на значение коэффициента полезного действия пренебречь. Магнитные и механические потери принимаются равными и постоянными при всех режимах работы машины.

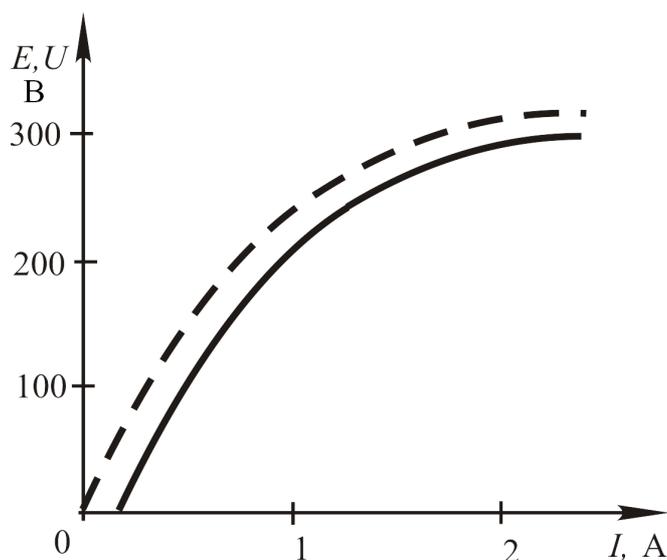


Рис. 7.4

По условию задачи ток якоря генератора, работающего в режиме холостого хода, равен 2,25 А. Ток обмотки возбуждения при номинальной нагрузке генератора равен 1,1 А. Сопротивление цепи возбуждения равно 200 Ом. В режиме холостого хода напряжение на выходе генератора по табл. 7.1 равно 249,4 В. Ток обмотки возбужде-

ния, таким образом, равен 1,247 А. Ток якоря без учета тока обмотки возбуждения равен 1,003 А. Мощность постоянных потерь равна произведению найденного тока на напряжение.  $\Delta P_{\text{пост}} = 1,003 \cdot 249,4 = 250$  Вт. Переменные потери пропорциональны квадрату тока якоря.

Для построения характеристики заполняем таблицу.

Таблица 7.5

$I$	15	12,5	10	7,5	5	2,5	0
$U$	220	225	230	234,9	240	244,4	249,4
$R_a I_a^2$	225	156	100	56	25	6,25	0
$P_{\Sigma}$	475	406	350	306	275	256	250
$P_2$	3300	2812	2300	1762	1200	611	0
$P_1$	3775	3220	2650	2068	1475	867	250
$\eta$	0,87	0,87	0,867	0,85	0,81	0,7	0

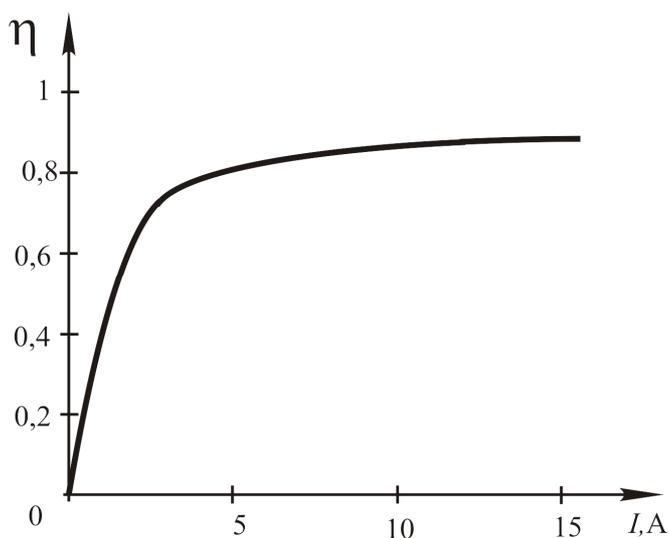


Рис. 7.5

Зависимость КПД генератора от тока нагрузки представлена на рис. 7.5.

Механический момент на валу генератора при номинальной нагрузке определяется отношением входной мощности генератора к угловой частоте вращения:

$$\Omega = n_{\text{ном}} \cdot \pi / 30 = 107,3 \text{ рад/с};$$

$$M = P_1 / \Omega = 35,2 \text{ Нм.}$$

## 7.5. ТЕЗАУРУС ПОНЯТИЙ ТЕМЫ

### Внешняя характеристика генератора.

Внешней характеристикой называют зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменном сопротивлении цепи возбуждения и постоянной номинальной частоте вращения якоря ( $U = f(I)$  при  $R_f = \text{const}$  и  $n = n_H = \text{const}$ ). Внешняя характери-

стика показывает изменение напряжения на выходе генератора при изменении тока нагрузки.

Для получения этой характеристики (рис. 7.6) устанавливают следующий режим работы генератора: якорь генератора вращают с номинальной частотой, ток нагрузки, на которую работает генератор, должен быть номинальным, и ток возбуждения устанавливают исходя из номинального напряжения на зажимах генератора.

После этого уменьшают ток нагрузки до нуля. При этом напряжение на зажимах генератора возрастает.

При увеличении тока нагрузки от нуля до номинального значения напряжение на зажимах генератора уменьшается из-за увеличения падения напряжения на сопротивлении цепи якоря  $IR_a$  и из-за уменьшения ЭДС, обусловленного реакцией якоря.

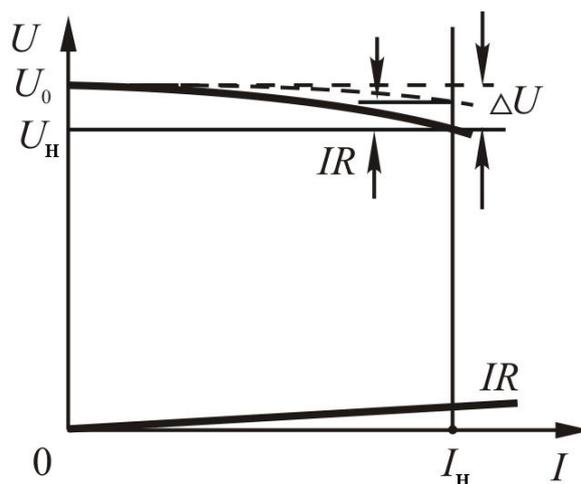


Рис. 7.6

В нижней части графика показана зависимость падения напряжения на сопротивлении цепи якоря от тока нагрузки  $IR(I)$ .

Внешняя характеристика может быть построена по характеристике холостого хода с помощью характеристического треугольника. Предполагается, что длины сторон треугольника пропорциональны току нагрузки. Для определения сторон характеристического треугольника необходимо провести следующие испытания. С помощью измерительных приборов измерить сопротивление якорной цепи  $R$ . Собрать электрическую цепь для испытания генератора. Изменяя ток возбуждения генератора, работающего в режиме холостого хода, установить номинальное значение напряжения на его зажимах. Измерить ток возбуждения, соответствующий этому напряжению  $I'_f$ . Нагрузить генератор номинальной нагрузкой. Изменяя ток возбуждения, установить номинальное напряжение на зажимах генератора при номинальном токе. Ток возбуждения в этом случае будет равен но-



ординат представлена внешняя характеристика генератора  $U = f(I)$  и линейная вольт-амперная характеристика нагрузки  $U_A = f(I_A)$ . Рабочей точкой генератора называют точку пересечения внешней характеристики генератора с вольт-амперной характеристикой нагрузки.

### Вольт-амперная характеристика цепи возбуждения генератора.

Вольт-амперной характеристикой цепи возбуждения называют зависимость напряжения на зажимах цепи возбуждения от тока возбуждения. Сопротивление цепи возбуждения равно сумме сопротивления обмотки и сопротивления реостата. В зависимости от величины сопротивления регулировочного реостата  $R_{pf}$  характеристики имеют разный угол наклона к оси токов возбуждения.

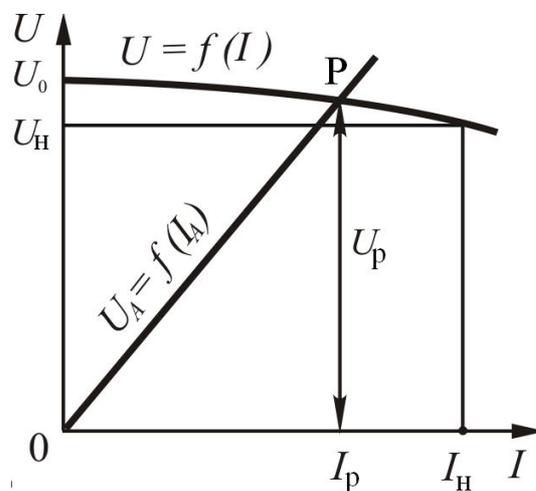


Рис. 7.8

### Встречное включение обмоток возбуждения.

Включение последовательной и параллельной обмоток возбуждения генератора называют встречным, если магнитодвижущие силы этих обмоток направлены навстречу друг другу. Магнитные потоки, создаваемые обмотками, имеют противоположное направление, поэтому результирующий магнитный поток равен разности магнитных потоков намагничивающих сил обмоток.

### Генератор (Г) постоянного тока.

Генераторами постоянного тока называют электрические машины, преобразующие механическую энергию вращения в электрическую энергию постоянного тока.

При вращении с помощью первичного двигателя ротора Г постоянного тока в магнитном поле, образованном обмоткой возбуждения, в обмотке якоря в соответствии с **законом электромагнитной индукции** наводится ЭДС. Максимальное значение ЭДС будет иметь место при расположении стороны катушки под магнитным полюсом.

При пересечении обмоткой якоря оси **геометрической нейтрали** ЭДС обращается в нуль, при дальнейшем повороте ротора изменяет знак на противоположный. Для выпрямления возникающего в обмотке якоря переменного напряжения используется **коллектор**, благодаря чему со щеток Г снимается напряжение постоянного тока с небольшим уровнем пульсаций. Значение напряжения на зажимах обмотки якоря определяется частотой вращения и током возбуждения. Выходные характеристики Г зависят от способа возбуждения (**электромагнитное** или от **постоянных магнитов**) и от схемы включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря. На практике используются Г постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным электромагнитным возбуждением.

**Генератор с независимым возбуждением.** Генератором с независимым возбуждением называют генератор, обмотка возбуждения которого получает питание от независимого от генератора источника электрической энергии. Ток возбуждения не зависит от тока якоря. Сила тока возбуждения невелика и составляет  $1 \div 3$  % от номинального тока якоря. Для уменьшения тока возбуждения и мощности постороннего источника тока обмотка возбуждения Г выполняется из тонкого провода и имеет большое количество витков. При неизменных частоте вращения и потоке возбуждения выходное напряжение Г зависит только от значения нагрузки. При увеличении нагрузки напряжение снижается вследствие падения напряжения на активных сопротивлениях **обмотки якоря** и **компенсационной обмотки**. Изменение напряжения на зажимах генератора с независимым возбуждением при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения составляет  $5 \div 10$  % от номинального значения.

Напряжение на зажимах генератора с независимым возбуждением при увеличении тока нагрузки уменьшается по следующим причинам:

- из-за падения напряжения на сопротивлении цепи якоря;

– из-за уменьшения ЭДС, вызванного уменьшением магнитного потока под действием реакции якоря.

Электрическая схема включения генератора показана на рис. 7.9.

### Генератор с параллельным возбуждением.

Генератором с параллельным возбуждением называют генератор, обмотка возбуждения которого подключена к выходным зажимам генератора и получает питание от самого генератора.

В данном случае используется принцип **самовозбуждения**, при котором обмотка возбуждения получает питание непосредственно с выходных зажимов генератора. Последовательно с обмоткой возбуждения включается регулировочный реостат.

Напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением при увеличении тока нагрузки уменьшается по следующим причинам:

- из-за падения напряжения на сопротивлении цепи якоря;
- из-за уменьшения ЭДС, вызванного уменьшением магнитного потока под действием реакции якоря;
- из-за уменьшения напряжения на зажимах обмотки возбуждения, вызванного первыми двумя причинами. Уменьшение напряжения на зажимах обмотки возбуждения приводит к уменьшению тока возбуждения и, как следствие, магнитного потока машины.

При перегрузке имеет место резкое снижение напряжения на обмотке якоря. Одновременно из-за снижения напряжения происходит уменьшение тока в обмотке якоря. В режиме короткого замыкания ток возбуждения и напряжение на обмотке якоря близки к нулю. Протекающий через обмотку якоря ток в этом случае определяется остаточным намагничиванием магнитной системы Г. Таким образом, до номинальной нагрузки Г имеет жесткую внешнюю характеристику, падающий характер которой проявляется только при перегрузке, причем в этом режиме происходит автоматическое ограничение тока короткого замыкания. Генераторы постоянного тока параллельного

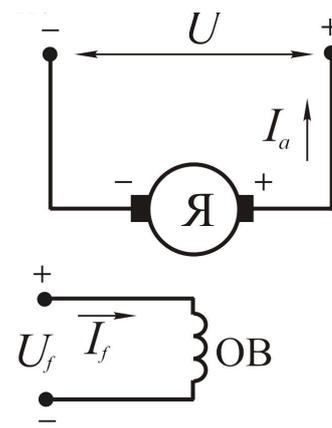


Рис. 7.9

возбуждения наиболее часто используются в качестве возбудителей синхронных генераторов, устанавливаемых в системах электроснабжения судов, самолетов и автомобилей.

Электрическая схема включения генератора показана на рис. 7.10.

### Генератор с последовательным возбуждением.

Генератор постоянного тока, обмотка возбуждения которого включена последовательно с якорем, называют генератором с последовательным возбуждением. Генератор с последовательным возбуждением работает в режиме **самовозбуждения**.

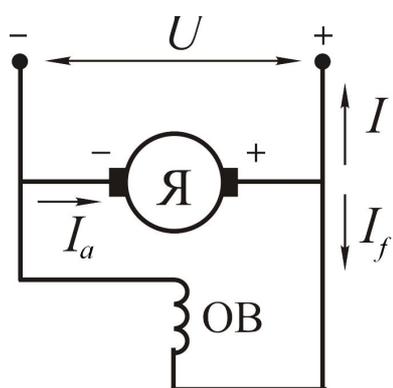


Рис. 7.10

Ток обмотки возбуждения равен или составляет часть тока якоря. Последний случай имеет место тогда, когда параллельно с последовательной обмоткой возбуждения включен реостат, предназначенный для регулирования тока обмотки возбуждения.

Напряжение на выходе генератора постоянного тока с последовательным возбуждением зависит от сопротивления нагрузки. При увеличении сопротивления нагрузки напряжение на зажимах генератора резко падает, так как ток возбуждения равен или пропорционален току нагрузки. В режиме холостого хода выходное напряжение определяется остаточным намагничиванием магнитной системы и имеет малую величину. При увеличении тока нагрузки происходит увеличение тока и потока возбуждения, а, следовательно, и рост напряжения на обмотке якоря. При превышении током нагрузки номинального значения увеличение напряжения на обмотке якоря прекращается или даже происходит его уменьшение ввиду насыщения магнитной системы генератора. При коротком замыкании поток возбуждения имеет максимальное значение, что приводит к перегреву генератора. Ввиду сильной зависимости выходного напряжения от тока нагрузки генераторы с последовательным возбуждением не получили широкого распространения и используются в основном в тех случаях, когда значение нагрузки меняется мало, например для питания только фар автомобиля.

Электрическая схема включения генератора показана на рис. 7.11.

### Генератор со смешанным возбуждением.

Генератором со смешанным возбуждением называют генератор, на главных полюсах которого располагаются две обмотки возбуждения. При этом одна из них предназначена для включения последовательно с якорной обмоткой, а другая предназначена для параллельного включения.

У генераторов со смешанным возбуждением обмотки могут быть включены согласно или встречно. Согласно называют такое включение обмоток, когда намагничивающие силы обмоток и магнитные потоки, создаваемые обмотками, складываются. В противном случае включение называют встречным. Тот или другой способ включения обмоток используют в зависимости от требований, предъявляемых к генератору. Если требуется неизменность напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки в широких пределах, используется согласное включение.

Электрическая схема включения генератора показана на рис. 7.12.

Параллельная обмотка может быть включена двояко в соответствии со схемой, изображенной на рис. 7.13.

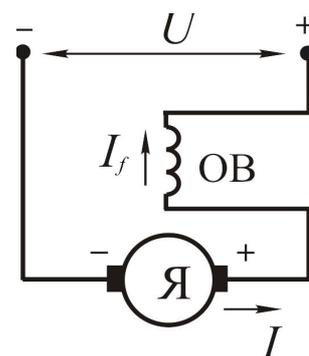


Рис. 7.11

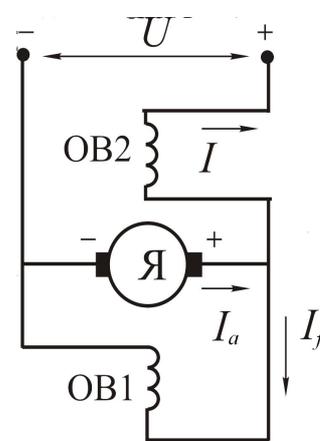


Рис. 7.12

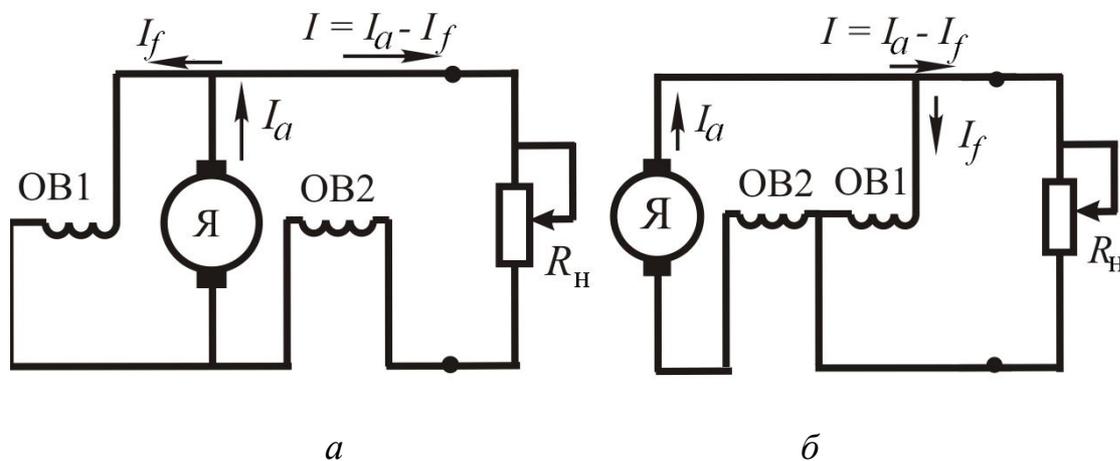


Рис. 7.13

Первое соединение, когда параллельная или шунтовая обмотка ОВ1 включена непосредственно на щетки, называется коротким включением (рис. 7.13, а), а соединение, представленное на рис. 7.13, б, когда параллельная обмотка подключена к выходным зажимам, носит название длинного включения. Эти два способа подключения шунтовой обмотки почти эквивалентны с учетом того, что во втором случае ток параллельной обмотки протекает по виткам последовательной обмотки возбуждения, создавая дополнительную составляющую магнитного потока последовательной обмотки возбуждения.

Обе обмотки возбуждения расположены на главных полюсах, однако результирующая намагничивающая сила может быть равной сумме намагничивающих сил обмоток или их разности в зависимости от способа включения обмоток. Генератор, у которого магнитные потоки обмоток усиливают друг друга (магнитодвижущие силы обмоток складываются), называется генератором смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения. Генератор, у которого магнитные потоки обмоток ослабляют друг друга, называется генератором смешанного возбуждения со встречным включением обмоток.

Генераторы с согласным включением обмоток используются тогда, когда требуется стабильность выходного напряжения при изменении тока нагрузки.

Генераторы со встречным включением обмоток имеют так называемую крутопадающую внешнюю характеристику, когда при определенной величине тока нагрузки небольшое его увеличение приводит к значительному снижению напряжения на зажимах генератора. Генераторы с подобными внешними характеристиками используются обычно в сварочных установках.

Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением с согласным включением обмотки показывает, что намагничивающая сила последовательной обмотки компенсирует реакцию якоря и падение напряжения на сопротивлении якорной обмотки. При изменении тока генератора от нуля до номинального значения напряжение на зажимах генератора даже несколько возрастает. При меньшем сопротив-

лении цепи якоря и при большем влиянии последовательной обмотки внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением с согласным включением обмоток будет расположена выше.

Снижение напряжения на зажимах генератора смешанного возбуждения со встречным включением обмоток при увеличении тока нагрузки является результатом воздействия следующих факторов:

- падения напряжения на сопротивлении цепи якоря;
- размагничивающего действия реакции якоря;
- размагничивающего действия последовательной обмотки при увеличении тока нагрузки;
- уменьшения тока параллельной обмотки возбуждения из-за уменьшения напряжения на ее зажимах, обусловленного предыдущими факторами.

### **Классификация генераторов постоянного тока.**

Процесс разделения генераторов постоянного тока по отличительным признакам называют классификацией.

Примером классификации генераторов постоянного тока является классификация по способам создания магнитного поля генераторов или по способам возбуждения генераторов.

В зависимости от способа создания магнитного поля различают генераторы с независимым возбуждением (рис. 7.14, *a*) и генераторы с самовозбуждением (рис. 7.14, *б, в, г*).

Для питания обмотки возбуждения генератора с независимым возбуждением используют внешний источник постоянного тока. Напряжение возбуждения  $U_f$  может быть отличным от напряжения на зажимах генератора  $U$ .

Однако на первый взгляд покажется странным то, что обмотка возбуждения генератора, который сам является источником постоянного тока, получает питание от другого независимого источника постоянного тока. В ряде случаев это необходимо, но чаще всего обмотка возбуждения получает питание от самого генератора. Другими словами, чаще всего используют генераторы с самовозбуждением.

Генераторы с самовозбуждением по способу включения обмоток возбуждения делятся на генераторы с параллельным возбуждением (рис. 7.14, б), генераторы со смешанным возбуждением (рис. 7.14, в) и генераторы с последовательным возбуждением (рис. 7.14, з).

У генератора с параллельным возбуждением обмотка возбуждения включена на зажимы якоря и питается частью тока якоря (рис. 7.14, б):  $I_a = I + I_f$ , где  $I_a$  – ток якоря генератора,  $I$  – ток на выходе генератора,  $I_f$  – ток обмотки возбуждения генератора. Для

изменения тока возбуждения генератора с параллельным возбуждением необходимо включить дополнительный резистор последовательно с обмоткой. У генератора с последовательным возбуждением (рис. 7.14, з) ток якоря является током обмотки возбуждения:  $I_f = I = I_a$ . Таким образом, ток возбуждения генератора с последовательным возбуждением зависит от нагрузки. Регулирование тока возбуждения в этом случае усложняется, и оно возможно лишь путем изменения сопротивления резистора, включенного параллельно обмотке возбуждения.

У генераторов со смешанным возбуждением (рис. 7.14, в) обмотки могут быть включены согласно или встречно. В сварочных установках, где значительное изменение сопротивления дуги не должно приводить к значительному изменению тока, используют встречное включение обмоток возбуждения. Реальные конструкции сварочных генераторов постоянного тока несколько отличаются от классической конструкции.

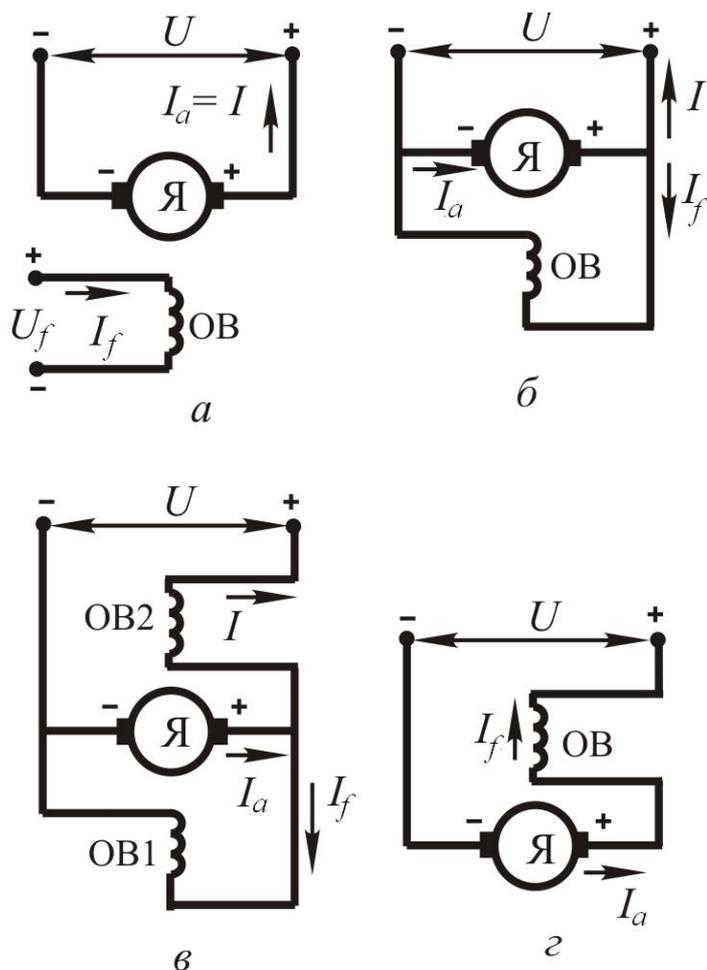


Рис. 7.14

**Короткое замыкание (КЗ) генератора** – предельный режим вращающегося возбужденного генератора при замкнутых накоротко выводах цепи обмотки якоря.

При КЗ генератора с последовательным возбуждением через обмотку якоря и обмотку возбуждения протекает большой ток, ограничиваемый только сопротивлениями обмоток, которые при этом быстро нагреваются. Магнитная система генератора находится в состоянии насыщения, и соответствующий ему поток возбуждения и ток обмотки якоря создают большой тормозной момент, что приводит к быстрой остановке генератора.

При КЗ генератора с параллельным возбуждением шунтирование обмотки якоря приводит к шунтированию и обмотки возбуждения, вследствие чего поток возбуждения практически определяется только остаточным намагничиванием полюсов. Возникающее от остаточного потока напряжение на обмотке якоря значительно меньше номинального. Это приводит к тому, что при внезапном КЗ генератора с параллельным возбуждением происходит резкое снижение создаваемого им момента сопротивления, приложенного к валу первичного двигателя. Первичный двигатель увеличивает частоту вращения, что в свою очередь приводит к увеличению тока КЗ генератора и к увеличению создаваемого им момента сопротивления.

Процесс короткого замыкания ГПТ описывается с помощью характеристики короткого замыкания, которая определяет зависимость тока в цепи якоря от тока возбуждения при отсутствии напряжения на зажимах генератора.  $I_a = f(I_f)$  при  $n = n_n = \text{const}$ ,  $U = 0$ . Характеристика короткого замыкания имеет вид прямой линии. Она определяется из уравнения электрического равновесия

$$U = C_e \cdot n \cdot \Phi_0 - I_a \cdot r_a - \Delta U_{\text{щ}} = 0.$$

Отсюда  $I_a = I_{\text{кз}} = \frac{C_e \cdot n \cdot \Phi_0 - \Delta U_{\text{щ}}}{R_a}$ . Следовательно, ток якоря прямо

пропорционален магнитному потоку, а так как в этом режиме машина не насыщена, и току обмотки возбуждения.

Поскольку сопротивление  $R_a$  обычно мало, для того чтобы ток в обмотке якоря остался в пределах номинального, магнитный поток должен быть небольшим. Это достигается уменьшением тока возбуждения до значения  $I_{fk}$ , обеспечивающего номинальный ток якоря при коротком замыкании.

### **Коэффициент полезного действия генератора постоянного тока.**

Коэффициентом полезного действия генератора постоянного тока называют коэффициент, равный отношению мощности, отдаваемой генератором потребителю электрической энергии, к мощности, потребляемой генератором от приводного механизма.

Энергия, потребляемая от приводного двигателя (источника механической энергии), распределяется следующим образом: часть мощности идет на преодоление механических потерь  $P_{мех}$ ; часть мощности идет на потери в стали  $P_{ст}$  и часть энергии теряется в цепи якоря  $P_m$ . Потери в цепи якоря, обусловленные нагреванием обмотки якоря, называют потерями в меди. Полезная выходная мощность  $P_2$  равна произведению напряжения на выходе на ток нагрузки  $P_2 = UI$ . Коэффициент полезного действия генератора определяется по традиционной формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_{мех} + P_m} = \frac{P_1 - P_{ст} - P_{мех} - P_m}{P_1}.$$

Генератор с независимым возбуждением получает механическую энергию от приводного механизма и от источника питания обмотки возбуждения  $P_f$ , т.е.  $P_{дв} + P_f = P_1$ . Электрическая энергия источника питания обмотки возбуждения превращается в тепловую энергию в обмотке возбуждения. Часть механической энергии приводного механизма затрачивается на преодоление трения (механические потери  $P_{мех}$ ), потери в стали  $P_{ст}$  и потери на нагревание элементов электрической цепи якоря  $P_a$  (нагреваются обмотки, коллектор и щетки).

В случае генератора с самовозбуждением для питания обмотки возбуждения используется часть электрической энергии, выработанной генератором, тогда

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_{ст} + P_{мех} + P_M} = \frac{P_1 - P_f - P_{ст} - P_{мех} - P_M}{P_1}.$$

Для вычисления КПД генераторов необходимо знать величины потерь мощностей, входящих в формулы.

Входная механическая мощность приводного двигателя вычисляется умножением механического момента на валу на частоту вращения  $P_{дв} = M \cdot \Omega$ , где  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ . Выходная мощность  $P_2$  равна произведению тока генератора на выходное напряжение  $P_2 = UI$ . Мощность обмотки возбуждения вычисляется по реальным значениям напряжения  $U_f$  и тока  $I_f$  возбуждения  $P_f = U_f I_f$ . Мощность переменных потерь, или потерь в цепи якоря, вычисляется по формуле  $P_M = R_a I_a^2$ ,

где  $R_a$  – сопротивление цепи якорной обмотки,  $I_a$  – ток якоря, величина которого не всегда равна току нагрузки генератора.

### **Критическое сопротивление цепи возбуждения генератора.**

То наибольшее сопротивление цепи возбуждения генератора, состоящей из обмотки возбуждения и регулировочного реостата, при котором еще возможно **самовозбуждение** генератора. Вольтамперная характеристика при этом является касательной к начальному участку усредненной характеристики холостого хода генератора.

ЭДС генератора, а, следовательно, и характеристика холостого хода зависят от частоты вращения якоря. Таким образом, величина критического сопротивления зависит от частоты вращения якоря.

Значение критического сопротивления можно определить, добившись номинального режима работы генератора с **самовозбуждением**. Если увеличить регулировочное сопротивление цепи  $R_{pf}$ , то вольтамперная характеристика цепи (прямая 2, рис. 7.7) изменится. Для другого значения сопротивления регулировочного реостата точка устойчивого равновесия сместится вниз по характеристике холостого хода. Дальнейшее увеличение сопротивления цепи возбуждения может привести к такому положению прямой, когда она будет касаться

характеристики холостого хода (прямая 3, рис. 7.7). При таком значении сопротивления цепи возбуждения генератора не произойдет.

### Крутопадающая внешняя характеристика генераторов.

Внешняя характеристика генератора называется крутопадающей, если при небольшом изменении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора резко уменьшается.

Крутопадающую внешнюю характеристику имеют генераторы со смешанным возбуждением с встречным включением обмоток возбуждения (кривая 2, рис. 7.15) и сварочные генераторы.

**Максимальное значение КПД генератора** имеет место при определенных условиях, определяемых соотношением потерь в генераторе.

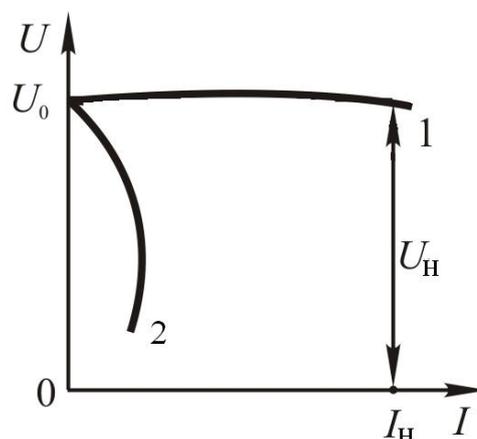


Рис. 7.15

Постоянные потери, которые равны сумме мощностей механических потерь и потерь в стали, определяются экспериментально. Они равны мощности, потребляемой генератором, работающим в режиме холостого хода. В соответствии с энергетическими диаграммами при  $P_2 = 0$  и  $P_1 = 0$ , в случае генератора с постоянным магнитом, входная мощность  $P_1$  будет равна сумме механических потерь и потерь в стали. Мощность постоянных потерь генератора с независимым возбуждением ( $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$ ) будет равна мощности приводного двигателя, если ток якоря генератора равен нулю. В случае генератора с самовозбуждением для экспериментального определения постоянных потерь испытание генератора необходимо проводить в режиме питания обмотки возбуждения от независимого источника.

Выходная мощность генератора  $P_2 = UI$ , а постоянные потери равны сумме механических потерь и потерь в стали  $P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$ . Мощность потерь в цепи якоря пропорциональна квадрату тока  $P_a = R_a I_a^2$ . Пренебрегая мощностью цепи возбуждения, можно записать формулу определения КПД:

$$\eta = \frac{UI}{UI + P_0 + R_a I^2}.$$

Считая выходное напряжение генератора величиной постоянной  $U = const$ , запишем производную КПД по току:

$$\eta' = \frac{U(UI + P_0 + R_a I^2) - UI(I + R_a 2I)}{(UI + P_0 + R_a I^2)^2}.$$

Приравнивая числитель дроби к нулю, получаем:

$$UI + P_0 + R_a I^2 - UI - R_a 2I = 0 \text{ или } I_n = \frac{U}{R_a + R_n}.$$

Так как переменные потери определяются мощностью потерь в меди  $P_m = R_a I^2$ , можно утверждать, что КПД достигнет своего максимального значения тогда, когда переменные потери будут равны постоянным потерям. Другими словами, КПД будет иметь максимальное значение, если мощность потерь в якорной цепи будет равна сумме мощностей потерь в стали и мощности механических потерь.

### **Механические потери в генераторе постоянного тока.**

Механические потери генератора обусловлены трением в подшипниках, трением щеток о поверхность коллектора, трением якоря о воздух и механическими потерями вентилятора. Преобладающими являются потери на трение в подшипниках и трение щеток о коллектор. Как правило, можно считать, что механические потери являются постоянными и не зависящими от частоты вращения якоря.

### **Нагрузочная характеристика генератора постоянного тока.**

Нагрузочной характеристикой называют зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения при токе нагрузки, равном номинальному току, и постоянной частоте вращения якоря.

В дальнейшем будем предполагать, что щетки относительно коллектора находятся в обычном рабочем положении. Поскольку по обмотке якоря генератора протекает ток  $I_a$ , напряжение на его зажимах уменьшится на величину падения напряжения на сопротивлении цепи якоря  $iR_a$ . Кроме того, напряжение на зажимах генератора уменьшается из-за уменьшения магнитного потока, обусловленного размагничивающим действием реакции якоря. При одном и том же токе возбуждения маг-

нитный поток генератора, работающего в режиме холостого хода, больше, чем магнитный поток нагруженной машины. ЭДС нагруженного генератора пропорциональна отрезку  $CD$  на рис. 7.16. Поэтому нагрузочная характеристика проходит ниже характеристики холостого хода.

Если при определенном токе возбуждения к величине напряжения прибавить падение напряжения  $IR$ , то получим другую характеристику, определяющую зависимость ЭДС нагруженного генератора от тока возбуждения:  $E = U + IR$ . Эта характеристика проходит ниже характеристики холостого хода. Так как ЭДС в любом случае пропорциональна магнитному потоку, можно сделать заключение о том, что ЭДС нагруженного генератора уменьшается из-за уменьшения суммарного магнитного потока машины. Это объясняется размагничивающим действием реакции якоря. Чтобы величина ЭДС ненагруженного генератора была такой, как у нагруженного, необходимо уменьшить величину тока возбуждения на величину  $\Delta I_f$  (рис. 7.16).

Приведенные рассуждения позволяют построить так называемый

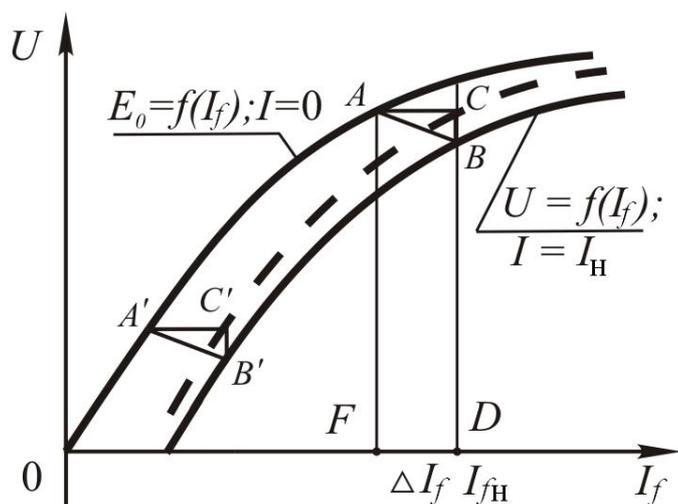


Рис. 7.16

**характеристический треугольник  $ABC$** , то есть треугольник, один катет которого  $BC$  пропорционален падению напряжения на элементах якорной цепи, а второй катет  $AC$  пропорционален приращению тока возбуждения, необходимого для компенсации реакции якоря нагруженного генератора.

Для определения катета  $BC$  необходимо измерить сопротивление якорной цепи  $R$  одним из известных способов и умножить полученное значение на значение номинального тока генератора. Умножив падение на масштаб напряжения, получим длину катета  $BC$ .

Приращение тока возбуждения  $\Delta I_f$ , пропорциональное отрезку  $ED$ , может быть получено экспериментально. Вычисляют ЭДС

нагруженного генератора, пропорциональную  $BD$ .  $E = U + I_n R$ , где  $U$  – напряжение на зажимах нагруженного генератора при номинальном токе возбуждения  $I_{fn}$ . При отключенной нагрузке устанавливают такую величину тока возбуждения, чтобы ЭДС на зажимах генератора была равна вычисленному ранее значению. Разность номинального тока возбуждения и тока возбуждения, полученного в результате проведенного эксперимента, определит величину приращения тока возбуждения  $\Delta I_f$ , пропорциональную отрезку  $ED$ .

### **Остаточный магнитный поток генератора.**

Магнитный поток магнитопровода генератора при отключенной от источника обмотке возбуждения и токе обмотки якоря, равном нулю, называют остаточным магнитным потоком. Магнитопровод никогда не работающей машины или специально размагниченной машины магнитно нейтрален, т.е. его остаточный магнитный поток равен нулю. Электротехническая сталь – магнитный материал, из которого изготовлен магнитопровод машины, имеет свойство сохранять некоторую намагниченность после полного намагничивания материала. На кривой намагничивания стали это явление представляется неравенством нулю индукции магнитного поля при напряженности, равной нулю. Значение этой индукции называют остаточной индукцией.

### **Параллельная обмотка возбуждения генератора.**

Обмотка, расположенная на главных полюсах машины, предназначенная для создания магнитного поля машины, имеющая сравнительно большое количество витков, выполненная проводом малого сечения и подключаемая в рабочем режиме параллельно нагрузке генератора, называется параллельной обмоткой возбуждения.

**Переменные потери в генераторе постоянного тока** – потери в генераторе постоянного тока, величина которых зависит от степени нагрузки генератора.

Одним из видов потерь являются потери в цепи якоря, пропорциональные квадрату тока якоря. Эти потери определяются потерями в сопротивлении проводников обмотки якоря, сопротивлении перехода «щетке – коллектор» и сопротивлении самих щеток. Обычно измеряют электрическое сопротивление цепи якоря, по величине которого

и судят о потерях. Этот вид потерь зависит от нагрузки, поэтому его относят к переменным потерям.

**Последовательная обмотка возбуждения генератора.** Обмотка, расположенная на главных полюсах машины, предназначенная для создания магнитного поля машины, имеющая сравнительно малое количество витков, выполненная проводом большого сечения и подключаемая в рабочем режиме последовательно с нагрузкой генератора, называется последовательной обмоткой возбуждения. Такую обмотку иногда используют для улучшения **внешней характеристики** генератора, т.е. для компенсации уменьшения напряжения на выходе генератора при увеличении тока якоря. Поэтому в этих случаях ее называют компенсационной.

#### **Постоянные потери в генераторе постоянного тока.**

Механические потери, потери энергии в цепи обмотки возбуждения и потери в стали называют постоянными потерями, так как они практически не зависят от нагрузки.

#### **Потери энергии в магнитопроводе генератора.**

Потери мощности на перемагничивание и на вихревые токи магнитопровода якоря генератора являются постоянными и не зависящими от нагрузки. Физическая основа этих потерь традиционна. Якорь является элементом машины, магнитопровод которого в рабочем состоянии постоянно перемагничивается. Потери мощности на перемагничивание стали связаны с магнитными характеристиками стали якоря. Кривая намагничивания стали неоднозначна или, как говорят, представляет собой гистерезисный цикл. Принято считать, что мощность потерь на перемагничивание магнитопровода якоря пропорциональна площади **петли гистерезиса** материала.

Потери на вихревые токи связаны с изменением магнитного поля в магнитопроводе якоря. Сталь, являясь проводником, имеет свободные электрические заряды, которые, находясь в переменном магнитном поле вращающегося якоря, начинают перемещаться по вихревому закону. Но, как уже известно, всякое перемещение зарядов в проводнике связано с потерями электрической энергии. Для уменьшения такого рода по-

терь используют магнитные материалы с повышенным удельным сопротивлением, а также изготавливают магнитопровод якоря из пакетов изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

### Рабочая точка внешней характеристики генератора.

Генераторы постоянного тока могут работать как на пассивную нагрузку, которую на схемах можно представить резистором, так и на активную нагрузку (режим заряда аккумуляторов). В любом случае для определения рабочей точки генератора, то есть напряжения и тока нагрузки, необходимо иметь **внешнюю характеристику генератора**  $U = f(I)$  и **вольт–амперную характеристику нагрузки**  $U_A = f(I_A)$ .

Если генератор нагружен резистором, вольт–амперная характеристика которого представлена прямой, то рабочая точка определяется точкой пересечения Р этой прямой с внешней характеристикой генератора. Напряжение на зажимах генератора тогда будет равно  $U_p$  и ток нагрузки  $I_p$  (рис. 7.17).

Если генератор используется для зарядки аккумуляторов, то рабочая точка находится с учетом характеристики аккумулятора, работающего в режиме потребления. Эта характеристика выражается уравнением  $U_A = E_A + IR_A$ , где  $U_A$  – напряжение на зажимах приемника (аккумулятора);

$E_A$  – ЭДС приемника или напряжение на его зажимах при токе, равном нулю;

$R_A$  – внутреннее сопротивление приемника (аккумулятора).

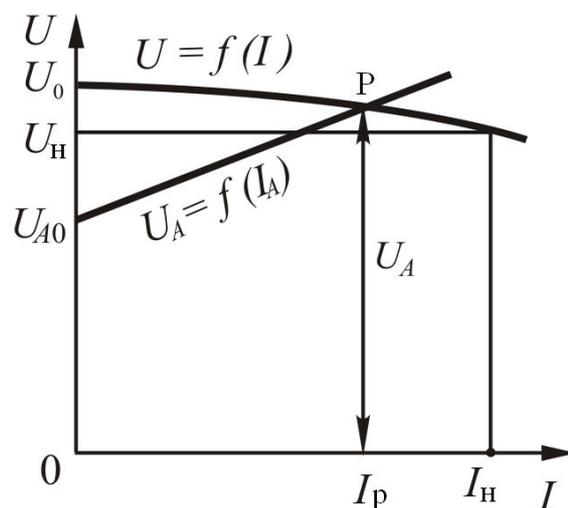


Рис. 7.17

На рис. 7.17 эта характеристика представлена прямой  $U_A = f(I_A)$ .

Рабочей точкой генератора является точка пересечения внешней характеристики с данной прямой (рис. 7.17). Эта точка определяет напряжение  $U_p$  и ток  $I_p$  нагрузки.

**Регулирование напряжения на выходе генератора постоянного тока** – изменение выходного напряжения генератора с помощью одного из доступных средств.

### **Регулировочная характеристика генератора.**

Под регулировочной характеристикой генератора постоянного тока понимают зависимость тока возбуждения от тока нагрузки  $I_f(I)$  при постоянном номинальном напряжении на зажимах генератора и неизменной номинальной частоте вращения якоря.

Регулировочная характеристика показывает, каким образом необходимо изменять ток возбуждения для поддержания неизменным

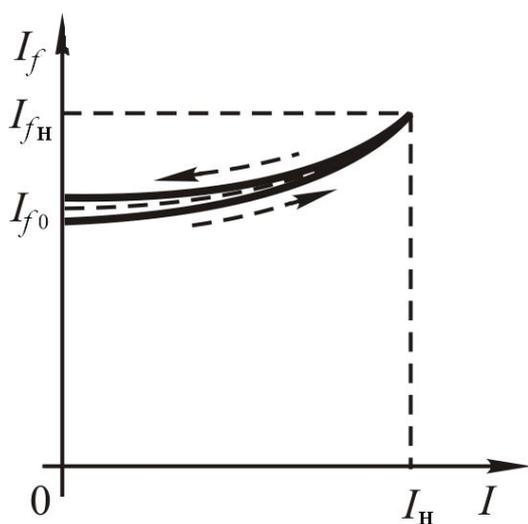


Рис. 7.18

напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки. Если снимать характеристику при увеличении тока нагрузки до номинального значения и затем при уменьшении его до нуля, то значения токов возбуждения при одних и тех же токах нагрузки будут различными. Это говорит о неоднозначности кривой намагничивания магнитного материала сердечника. Снятая таким способом регулировочная характеристика будет такой, какой она представлена на рис. 7.18. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается. Это уменьшение обусловлено размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения на сопротивлении цепи якоря.

Для того чтобы напряжение оставалось неизменным, необходимо уменьшение напряжения компенсировать увеличением ЭДС генератора. Это реализуется увеличением тока возбуждения в соответствии с регулировочной характеристикой.

Регулировочную характеристику генератора можно получить экспериментальным путем или графическим построением, используя **характеристику холостого хода и характеристический треуголь-**

**ник.** Для построения регулировочной характеристики обычно используют усредненную характеристику холостого хода (рис. 7.19).

Перед построением можно найти две точки характеристики. Первая точка определяется номинальным режимом работы генератора. Номинальному напряжению генератора  $U_H$  при номинальном токе нагрузки  $I_H$  соответствует номинальный ток возбуждения  $I_{fH}$ . Вторая точка является точкой характеристики холостого хода, которая соответствует номинальному напряжению  $U_H$  (точка  $A$ ) и соответствующему току возбуждения при токе нагрузки, равном нулю ( $I = 0$ ).

Для получения регулировочной характеристики следует построить треугольники  $ABC$  для различных значений тока  $I$ . Точка  $A$  находится всегда на характеристике холостого хода, а точка  $B$ , определяющая напряжение на зажимах генератора, всегда находится на линии  $AB_1$ . По расстоянию между точками  $B$  и осью ординат определяют значение токов возбуждения для различных значений токов нагрузки.

**Регулировочный реостат цепи возбуждения** – реостат, включаемый последовательно или параллельно обмотке возбуждения и используемый для изменения тока возбуждения.

Для изменения тока возбуждения, а, следовательно, и для регулирования напряжения на зажимах генератора последовательно или параллельно обмотке возбуждения включается реостат, который называют регулировочным реостатом.

При последовательном соединении сопротивление цепи возбуждения равно сумме сопротивления обмотки и сопротивления реостата. В зависимости от величины сопротивления регулировочного рео-

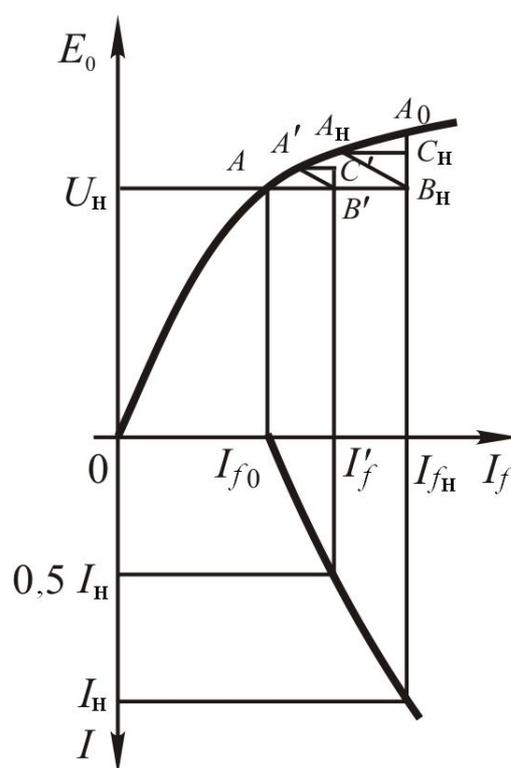


Рис. 7.19

стата  $R_{pf}$  характеристики имеют различный угол наклона к оси токов возбуждения.

### **Самовозбуждение генератора.**

Самовозбуждением генераторов постоянного тока называют способ получения достаточного по интенсивности магнитного поля машины за счет электрической энергии самого генератора без применения посторонних источников электрической энергии. Этот принцип саморегулирования впервые был обнаружен в 1886 г. Вернером Сиенсом и широко используется в современных машинах.

Мощность возбуждения составляет, как правило,  $2 \div 5\%$  мощности электрической машины. Большинство генераторов постоянного тока могут обеспечить самовозбуждение при соблюдении определенных условий.

Основным условием самовозбуждения генератора является наличие у машины остаточного магнитного потока  $\Phi_{ост}$ . Электротехническая сталь имеет кривую намагничивания в форме петли гистерезиса, поэтому при нулевом значении намагничивающей силы индукция магнитного поля воздушного зазора машины не равняется нулю. Ради справедливости следует отметить, что это имеет место только в случае, если магнитопровод был когда-либо намагничен и если магнитная система машины не была специально размагничена. Таким образом, остаточный магнитный поток определенного направления у работавших машин обычно имеется.

Если теперь обмотку возбуждения подключить к зажимам якорной цепи (рис. 7.20) и заставить вращаться якорь генератора с номинальной частотой, то на его зажимах появится слабое напряжение, обусловленное остаточным магнитным потоком. Так как обмотка возбуждения подключена к зажимам якорной цепи, в ней появится ток, создавая небольшую намагничивающую силу. Последняя создает свою составляющую магнитного потока.

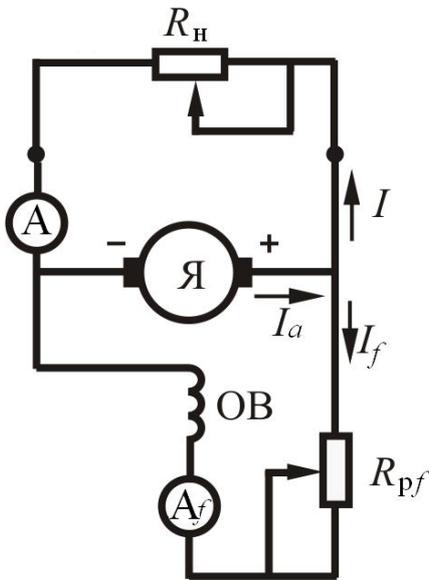


Рис. 7.20

Поток обмотки возбуждения при этом может совпадать, а может и не совпадать по направлению с остаточным магнитным потоком. Если магнитный поток обмотки возбуждения не совпадает по направлению с остаточным магнитным потоком, то он будет ослаблять остаточный магнитный поток машины.

Самовозбуждение генератора может иметь место тогда, когда магнитный поток обмотки возбуждения совпадает с остаточным магнитным потоком по направле-

нию. Одним словом, поток обмотки возбуждения должен усиливать остаточный магнитный поток. В результате увеличившийся поток приведет к увеличению электродвижущей силы машины, что в свою очередь вызовет увеличение тока возбуждения. Процесс самовозбуждения машины будет проходить лавинообразно.

Рассмотрим **характеристику холостого хода**, на которой представлена вольт-амперная характеристика цепи возбуждения (рис. 7.7). Вольт-амперной характеристикой цепи возбуждения называют зависимость напряжения на зажимах цепи от тока возбуждения. Сопротивление цепи возбуждения равно сумме сопротивления обмотки и сопротивления реостата. В зависимости от величины сопротивления регулировочного реостата  $R_{pf}$  характеристики имеют различный угол наклона к оси токов возбуждения (прямые 1, 2, 3, рис. 7.7).

Рассмотрим процесс самовозбуждения генератора, когда вольт-амперная характеристика цепи возбуждения представлена прямой 1 на рис. 7.7.

На рис. 7.7 напряжение  $U_0$  является напряжением на зажимах генератора, обусловленным остаточным магнитным потоком. Это напряжение обеспечивает прохождение тока  $I_{1f}$  обмотки возбуждения, определяемого по формуле  $I_{1f} = U_0/R_f$ . Сопротивление  $R_f$  равно

сумме сопротивления обмотки возбуждения и сопротивления регулировочного резистора  $R_{pf}$ . Ток возбуждения  $I_{1f}$  создает дополнительный магнитный поток. В результате появления этого магнитного потока на зажимах генератора получим напряжение  $U_1$  в соответствии с характеристикой холостого хода (рис. 7.7), но напряжению  $U_1$  соответствует ток возбуждения  $I_{2f}$ . В свою очередь этот ток создает такой магнитный поток, который обеспечивает напряжение  $U_2$  на зажимах генератора. Процесс самовозбуждения в действительности происходит лавинообразно до точки  $A_1$ , которая является точкой устойчивого равновесия. В результате процесса самовозбуждения на зажимах генератора получим величину ЭДС  $E_0 = U$ .

Если увеличить регулировочное сопротивление цепи  $R_{pf}$ , то вольт-амперная характеристика цепи изменится (прямая 2). Для другого значения сопротивления регулировочного реостата цепи возбуждения точка устойчивого равновесия сместится вниз по характеристике холостого хода (точка  $A_2$ ). Дальнейшее увеличение сопротивления цепи возбуждения может привести к такому положению прямой, когда она будет касаться характеристики холостого хода (прямая 3). Как следует из рисунка, при таком значении сопротивления цепи возбуждения генератора не произойдет. Сопротивление цепи возбуждения, при котором невозможно самовозбуждение генератора, называется **критическим**.

### **Сварочные генераторы постоянного тока.**

Генераторы постоянного тока, имеющие специальные внешние характеристики, обеспечивающие устойчивость горения электрической дуги и используемые в сварочных установках, называют сварочными генераторами.

Специальные крутопадающие внешние характеристики получают путем использования различных способов создания магнитного потока машины и путем использования расщепленных полюсов с эффектом насыщения магнитной системы генератора.

**Согласное включение обмоток возбуждения** – включение обмоток возбуждения генератора, при котором магнитодвижущая сила одной обмотки возбуждения создает магнитный поток, совпадающий по направлению с магнитным потоком, созданным намагничивающей силой второй обмотки.

**Способы создания магнитного потока генератора** – физические основы и совокупность элементов, используемых для создания магнитного поля машины постоянного тока.

**Уравнения механического и электрического равновесия генератора** – уравнения, описывающие принцип действия и характеристики ГПТ.

Уравнения механического равновесия  $M_1 - M_0 - M_{эм} = 0$  или  $M_1 = M_0 + M_{эм}$ . Из последнего уравнения следует, что вращающий момент приводного двигателя уравнивается двумя составляющими:  $M_0$  – составляющая вращающего момента приводного двигателя, уравнивающая тормозной момент, обусловленный потерями в генераторе при холостом ходе  $M_0 = \frac{P_0 \cdot 60}{2\pi \cdot n}$ , где  $P_0 = P_{мех} + P_{МГ}$ ;  $M_{эм}$  – составляющая вращающего момента приводного двигателя, уравнивающая электромагнитный момент, развиваемый якорем генератора при нагрузке.

Уравнение электрического равновесия для цепи возбуждения

$$U_f = I_f (r_f + R_{пер}) = I_f \cdot R_f,$$

где  $r_f$  – сопротивление обмотки возбуждения;  $R_f$  – сопротивление цепи возбуждения.

Уравнение электрического равновесия для цепи якоря

$$U = E_a - I_a \cdot R_a - \Delta U_{щ} \text{ или } U = C_e \cdot n \cdot \Phi_\delta - I_a \cdot R_a - \Delta U_{щ},$$

где  $I_a \cdot R_a = \Delta U$  – падение напряжения на внутреннем сопротивлении якоря;  $\Delta U_{щ}$  – падение напряжения в щеточном контакте.

Из уравнения электрического равновесия цепи якоря следует, что при постоянной частоте вращения напряжение на выходных зажимах генератора даже при изменении нагрузки не остается постоянным. Причиной этого является внутреннее падение напряжения  $\Delta U$ , а также размагничивающее влияние поперечной реакции якоря.

### Условия параллельной работы генераторов.

Условия, при которых возможно функционирование двух или нескольких генераторов постоянного тока с одной и той же нагрузкой.

В ряде случаев при эксплуатации генераторов возникает необходимость их параллельного включения. Это бывает тогда, когда имеющийся генератор не развивает необходимой мощности. Иногда требуется обеспечить непрерывность питания сети, а генератор должен быть остановлен для профилактического обслуживания. Таким образом, возникает необходимость рассмотрения параллельного режима работы генераторов.

Схема параллельно включенных генераторов изображена на рис. 7.21. Источники механической энергии, приводящие во вращение якоря генераторов, на рисунке не показаны. Будем считать, что в цепи имеются все приборы, показанные на рисунке.

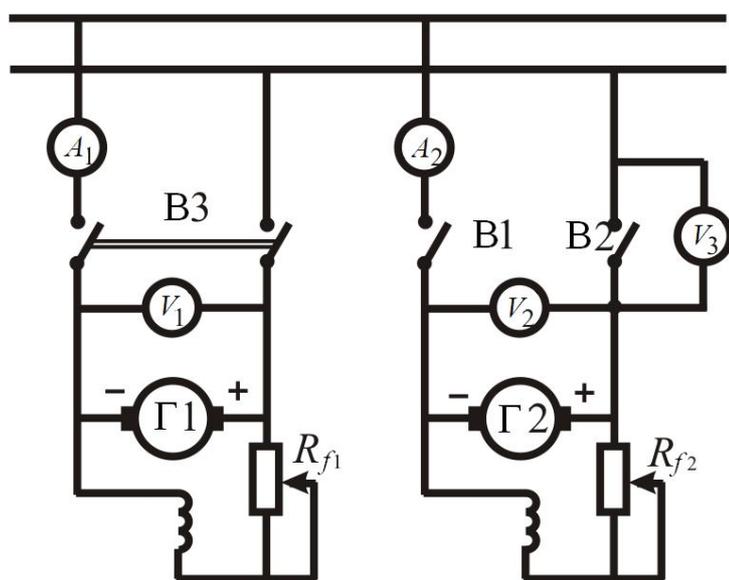


Рис. 7.21

хотимо обеспечить номинальную частоту вращения якоря второго генератора. Частоту вращения работающего генератора желательно поддерживать постоянной.

Пусть сеть получает питание от генератора Г1, подключенного к сети с помощью выключателя В3. При полной нагрузке генератора вольтметр  $V_1$  будет показывать номинальное напряжение и амперметр  $A_1$  номинальный ток.

Подключение второго генератора удобно произвести с помощью двух однополюсных выключателей В1 и В2. Перед подключением генератора Г2 необ-

У работающего генератора Г2 с помощью регулировочного реостата ( $R_{f2}$ ) необходимо обеспечить такой ток возбуждения, при котором напряжение на его зажимах было бы равно напряжению сети. Напряжение контролируется с помощью вольтметра  $V_2$ . Затем замыкается рубильник В1. Если полярность генератора Г2 соответствует полярности сети, вольтметр  $V_3$  покажет напряжение, близкое к нулю. Изменяя ток возбуждения генератора 2, добиваются нулевого показания вольтметра  $V_3$ , после чего замыкают рубильник В2. Генератор подключен к сети. Если невозможно добиться нулевого показания вольтметра  $V_3$  и он показывает напряжение больше напряжения сети, это свидетельствует о несоответствии полярности генератора Г2 полярности сети. В этом случае необходимо изменить полярность генератора Г2 и добиться нулевого показания вольтметра  $V_3$ .

При правильно включенном в сеть генераторе Г2 для перераспределения нагрузки необходимо увеличить ток возбуждения генератора Г2. ЭДС генератора и ток якоря увеличатся. Напряжение сети несколько увеличится, что приведет к уменьшению тока первого генератора. Ток второго генератора контролируется с помощью амперметра  $A_2$ .

Увеличивая ток обмотки возбуждения второго генератора, можно добиться равномерного распределения нагрузки между генераторами. Если всю нагрузку необходимо перевести на второй генератор, то следует уменьшить ток возбуждения первого генератора и увеличить ток второго. Таким образом, можно поддерживать напряжение сети неизменным.

Если первый генератор оставить включенным в сеть и продолжать уменьшение его тока возбуждения, то ток генератора Г1 изменит направление и машина будет работать в режиме двигателя. Правда, в определенных случаях изменение направления тока генератора приводит к аварийному режиму, поэтому в таких случаях используют защиту для отключения генератора при изменении направления тока якоря.

При неизменных скоростях вращения якорей генераторов, изменяя токи возбуждения, можно добиться необходимого распределения нагрузки между ними.

Рассмотрим два генератора, имеющие отличающиеся друг от друга **внешние характеристики** (рис. 7.22, кривые 1 и 2). Изменением тока возбуждения можно добиться равенства токов генераторов. На рис. 7.22 этот режим работы двух генераторов отмечен рабочей точкой *A*. Такое состояние или такой режим работы соответствует точке пересечения внешних характеристик. Когда сопротивление нагрузки уменьшится, токи генераторов увеличатся. В идеальном случае при полностью совпадающих внешних характеристиках токи генераторов будут равными при изменении нагрузки. Однако в реальных условиях характеристики не совпадают, и увеличение нагрузки приводит к уменьшению напряжения до величины  $U_2$ . При таком напряжении сети ток первого генератора будет равен току  $I_2$ . Ток второго генератора будет равен току  $I_1$ . Ток  $I_2 > I_1$ , и неравномерное распределение мощности между генераторами 1 и 2 очевидно.

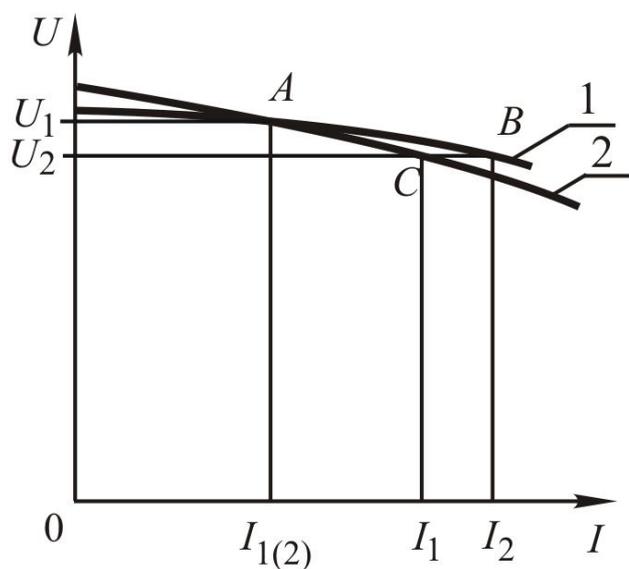


Рис. 7.22

В общем случае с помощью регулировочных реостатов можно скорректировать перераспределение нагрузки между генераторами, однако это требует дополнительного обслуживания генераторов.

По этой причине для параллельной работы необходимо применять генераторы одинакового типа с совпадающими внешними характеристиками. Возможно и использование для параллельной работы генераторов раз-

ной мощности. Это возможно тогда, когда их номинальные напряжения равны. Кроме того, при номинальных токах возбуждения напряжения холостого хода генераторов также должны быть равными. Только в этом случае распределение нагрузки будет пропорциональным номинальным мощностям генераторов.

Таким образом, подключение генератора для параллельной работы возможно тогда, когда выполняются следующие условия:

- полярности выходных напряжений должны совпадать;
- напряжение на зажимах подключаемого генератора должно равняться напряжению на зажимах сети, к которой подключается генератор.

Два генератора различной мощности могут работать параллельно с пропорциональным распределением нагрузки тогда, когда при номинальных токах нагрузки напряжения на зажимах равны между собой и напряжения холостого хода генераторов при тех же токах возбуждения равны между собой.

### **Условия самовозбуждения генератора.**

Совокупность условий, при удовлетворении которых генератор может обеспечить питание своих обмоток возбуждения током, достаточным для создания магнитного потока машины, при котором обеспечивается номинальный режим работы.

Самовозбуждение генератора постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения возможно в том случае, если:

- имеется остаточный магнитный поток;
- обмотка возбуждения подключена таким образом, что магнитный поток совпадает с остаточным магнитным потоком;
- сопротивление цепи возбуждения меньше критического.

Самовозбуждение генератора с последовательным возбуждением возможно в том случае, если:

- имеется остаточный магнитный поток;
- обмотка возбуждения подключена таким образом, что магнитный поток совпадает с остаточным магнитным потоком;
- сопротивление нагрузки равно номинальному сопротивлению.

**Характеристики генератора постоянного тока** – параметры и соотношения между ними, позволяющие судить о возможностях генераторов постоянного тока.

Характеристики генератора постоянного тока устанавливают связь между следующими параметрами генератора постоянного тока:

- напряжением на зажимах генератора  $U$  ;

- током возбуждения  $I_f$ ;
- током якоря  $I_a$ ;
- частотой вращения якоря  $n$ .

Необходимо отметить, что характеристики генератора удобно рассматривать, используя внешний ток или ток внешней сети. В случае генераторов с параллельным и со смешанным возбуждением ток внешней сети  $I$  равен разности тока якоря и тока возбуждения  $I = I_a - I_f$ , но ток возбуждения во многих случаях гораздо меньше тока якоря  $I_f < 0,05I_a$ , поэтому током возбуждения пренебрегают и принимают внешний ток, равный току якоря.

Основные характеристики генераторов следующие:

- **характеристика холостого хода**  $E = f(I_f)$  при  $I_a = 0$  и  $n = const$ ;
- **нагрузочная характеристика**  $U = f(I_f)$  при  $I = I_n$  и  $n = const$ ;
- **внешняя характеристика**  $U = f(I)$  при  $n = const$  и  $R_f = const$ ;
- **регулировочная характеристика**  $I_f = f(I)$  при  $U_n = U = const$  и  $n = const$ .

Здесь  $I_n$  и  $U_n$  – номинальные значения тока генератора и напряжения на его зажимах.

**Характеристика полного падения напряжения генератора постоянного тока.**

Характеристика полного падения напряжения  $\Delta U = f(I)$  определяет зависимость полного изменения напряжения на зажимах генератора от тока якоря.

**Реакция якоря** электрической машины зависит от выбора рабочей точки на **кривой намагничивания**, то есть от степени насыщения магнитопровода, поэтому особый интерес вызывает рассмотрение кривой реакции якоря (рис. 7.23, кривая 1). Характеристика показывает, каким образом изменение ЭДС генератора зависит от тока якоря. Очевидным является то, что при большем токе возбуждения напряжение меньше, так как насыщение магнитной цепи больше и увеличение тока якоря вызывает дополнительное насыщение.

В генераторе внутреннее падение напряжения имеет две составляющие: уменьшение напряжения от реакции якоря и падение напряжения на общем сопротивлении якорной цепи  $IR$  (рис. 7.23, кривая 2). Характеристика полного падения напряжения (рис. 7.23, кривая 3) несет весьма полезную информацию о степени изменения напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки.

Практически характеристику полного падения строят по **внешней характеристике** генератора постоянного тока. Строят внешнюю характеристику генератора и затем определяют падение напряжения в форме разности электродвижущей силы генератора, работающего в режиме холостого хода,  $E_0$  и напряжения на зажимах нагруженного генератора.

**Характеристика холостого хода генератора постоянного тока** – зависимость электродвижущей силы генератора от тока возбуждения при неизменной частоте вращения якоря, равной номинальной, и токе нагрузки, равном нулю:  $E = f(I_f)$  при  $I = 0$  и  $n = n_n = \text{const}$ .

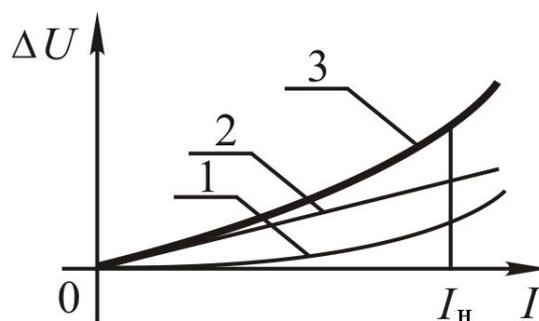


Рис. 7.23

Ввиду того, что магнитопровод машины всегда имеет остаточный магнитный поток, на зажимах генератора при токе возбуждения, равном нулю, всегда имеется остаточное напряжение  $U_0$  (рис. 7.24). Это напряжение составляет 2-3% от номинального напряжения генератора. Объяснить вид характеристики холостого хода, как и любой другой характеристики генератора, можно с помощью **уравнения электрического равновесия** для цепи якоря. Из него при условии, что ток якоря отсутствует, получим:  $U = E_a = C_e \cdot n \cdot \Phi_0$ , где  $\Phi_0$  – основной поток, созданный током возбуждения;  $C_e$  – постоянная, зависящая от конструкции машины;  $n$  – тоже величина постоянная в соответствии с условиями получения характеристики холостого хода.

Так как ток возбуждения определяет намагничивающую силу машины, а магнитный поток пропорционален индукции магнитного поля, связь между ЭДС и током возбуждения повторяет в некотором масштабе зависимость  $B(H)$  материала магнитопровода, то есть повторяет **кривую намагничивания** магнитопровода машины.

Для получения характеристики холостого хода необходимо провести испытание генератора. Характеристика снимается при отключенной нагрузке и позволяет судить о степени насыщения магнитопровода машины. Ток возбуждения изменяется от нуля до  $I_f = 1,25I_{fH}$  при положительном и отрицательном направлениях изменения тока. В результате эксперимента получается кривая, повторяющая по форме **петлю гистерезиса** (рис. 7.24).

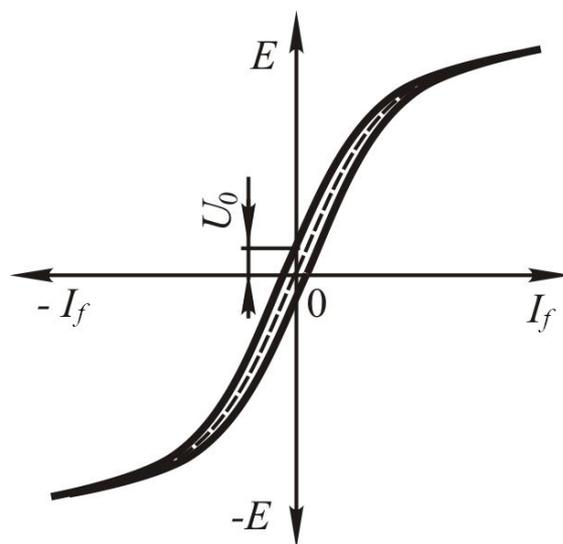


Рис. 7.24

Для построения других характеристик используется среднее значение напряжений при одном и том же токе возбуждения, или так называемая усредненная характеристика холостого хода, представленная на рис. 7.24 пунктирной линией.

**Характеристический треугольник генератора постоянного тока** – треугольник  $ABC$  (рис. 7.16), один катет которого  $BC$  пропорционален падению напряжения на элементах якорной цепи, а второй  $AC$  пропорционален приращению тока возбуждения, необходимого для компенсации реакции якоря нагруженного генератора.

Для определения катета  $BC$  необходимо измерить сопротивление якорной цепи  $R$  одним из известных способов и умножить полученное значение на значение номинального тока генератора. Умножив падение на масштаб напряжения, получим длину катета  $BC$ .

Приращение тока возбуждения  $\Delta I_f$ , пропорциональное отрезку  $FD$ , может быть получено экспериментально. Вычисляют ЭДС нагруженного генератора, пропорциональную длине отрезка  $CD$ .  $E = U + I_{ан}R$ , где  $U$  – напряжение на зажимах нагруженного генератора при номинальном токе возбуждения  $I_{ан}$  (отрезок  $BD$ ). При отключенной нагрузке устанавливают такую величину тока возбуждения, чтобы ЭДС на зажимах генератора была равна вычисленному значению ЭДС нагруженного генератора. Разность номинального тока возбуждения и тока возбуждения, полученного в результате проведенного эксперимента, определит величину приращения тока возбуждения  $\Delta I_f$ , пропорционального отрезку  $FD$ .

**Энергетическая диаграмма генератора** – диаграмма, поясняющая распределение потребляемой генератором постоянного тока энергии от внешних источников.

В общем случае следует рассматривать три варианта энергетической диаграммы в зависимости от типа генераторов (рис. 7.28).

На рис. 7.25, *а* представлена энергетическая диаграмма генератора с магнитным потоком, созданным постоянными магнитами.

Энергия, потребляемая от источника механической энергии (приводного двигателя), распределяется следующим образом. Часть мощности идет на преодоление механических потерь  $P_{мех}$ . Часть мощности идет на потери в стали  $P_{ст}$ . Часть энергии теряется в цепи якоря  $P_M$ . Потери в цепи якоря, обусловленные нагревани-

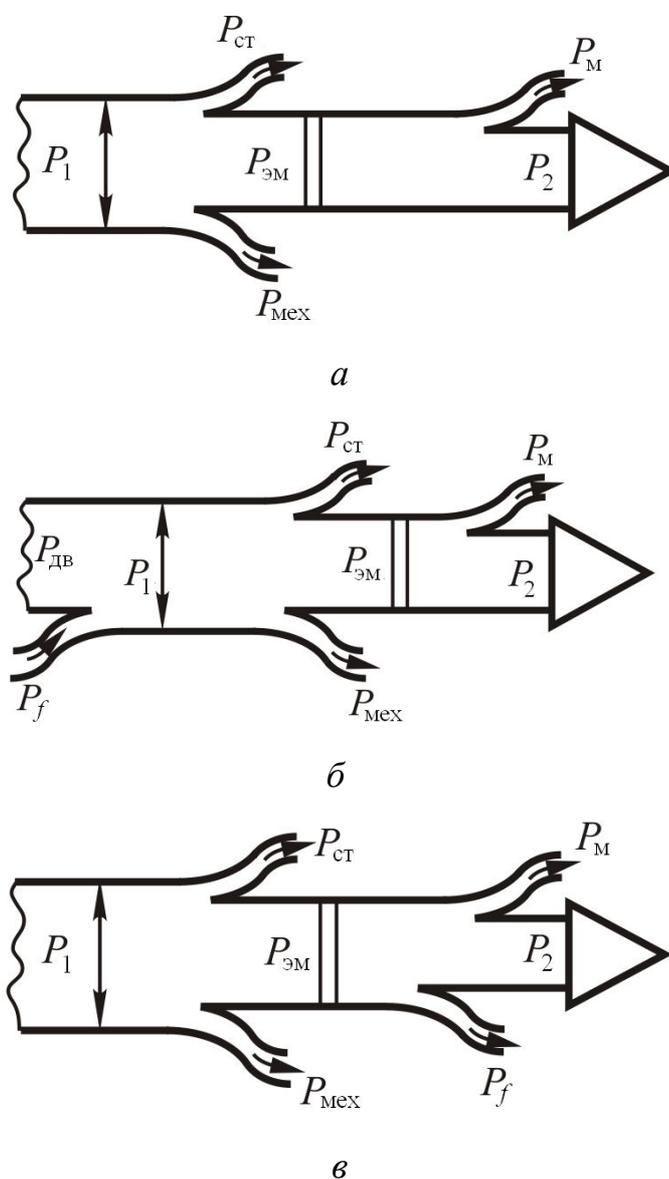


Рис. 7.25

ем обмотки якоря, называют иногда потерями в меди. Полезная выходная мощность  $P_2$  равна произведению напряжения на выходе на ток нагрузки  $P_2 = UI$ .

Генератор с независимым возбуждением получает механическую энергию от привода двигателя и от источника питания обмотки возбуждения  $P_f$  (рис. 7.25, б). Электрическая энергия источника питания обмотки возбуждения превращается в тепловую энергию в обмотке возбуждения. Часть механической энергии приводного механизма затрачивается на преодоление сил трения (механические потери  $P_{\text{мех}}$ ), потери в стали  $P_{\text{ст}}$  и потери на нагревание элементов электрической цепи якоря  $P_a$ . () Нагреваются обмотки, коллектор и щетки.

В случае генератора с самовозбуждением на питание обмотки возбуждения используется часть электрической энергии, выработанной генератором (рис. 7.25, в).

На энергетических диаграммах выделена электромагнитная мощность  $P_{\text{эм}}$ . Электромагнитная мощность определяется энергией, которая преобразуется в другой вид энергии. В случае генераторов постоянного тока электромагнитной энергией является энергия обмотки якоря, полученная в результате преобразования механической энергии.

Входная механическая мощность приводного двигателя вычисляется умножением механического момента на валу на частоту вращения:  $P_{\text{дв}} = M \cdot \Omega$ , где  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ . Выходная мощность  $P_2$  равна произведению тока генератора на выходное напряжение  $P_2 = UI$ . Мощность обмотки возбуждения вычисляется по реальным значениям напряжения  $U_f$  и тока  $I_f$  возбуждения:  $P_f = U_f I_f$ . Мощность переменных потерь, или потерь в цепи якоря, вычисляется по формуле  $P_m = R_a I_a^2$ , где  $R_a$  – сопротивление цепи якорной обмотки,  $I_a$  – ток якоря, величина которого не всегда равна току нагрузки генератора.

Постоянные потери, которые равны сумме мощностей механических потерь и потерь в стали, определяются экспериментально. Они

равны мощности, потребляемой генератором, работающим в режиме холостого хода. В соответствии с энергетическими диаграммами при  $P_2 = 0$  и  $P_m = 0$ , в случае генератора с постоянным магнитом, входная мощность  $P_1$  генератора, работающего в режиме холостого хода, будет равна сумме механических потерь и потерь в стали. Мощность постоянных потерь генератора с независимым возбуждением  $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$  будет равна мощности приводного двигателя и мощности источника питания обмотки возбуждения генератора, работающего в режиме холостого хода. В случае генератора с самовозбуждением для экспериментального определения постоянных потерь испытание генератора необходимо проводить в режиме питания обмотки возбуждения от независимого источника.

Знания, полученные в ходе изучения данной главы, применяются в решении производственных задач. Необходимо знать ответы, например, на такие вопросы.

1. Что произойдет, если регулятор возбуждения ГПТ неисправен или не соответствует машине? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

2. Что произойдет, если из-за повреждения изоляции произошло соединение параллельной обмотки с обмоткой добавочных полюсов или с последовательной обмоткой? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

3. Что произойдет в генераторе с параллельным возбуждением, если щетки далеко сдвинуты с нейтрали? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

4. Что произойдет в генераторе с параллельным возбуждением, если направление вращения машины выбрано неправильно или параллельная обмотка неправильно соединена с якорем? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

5. Опишите подробно в рабочей тетради процесс самовозбуждения ГПТ параллельного возбуждения при междувитковом соединении или коротком замыкании в одной или нескольких катушках возбуждения.

6. Как влияет на процесс самовозбуждения ГПТ параллельного возбуждения короткое замыкание в обмотке якоря, между пластинами или петушками коллектора? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

7. Как влияет на процесс самовозбуждения ГПТ параллельного возбуждения обрыв или плохой контакт в цепи возбуждения? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

8. Каким будет напряжение генератора, если частота вращения первичного двигателя меньше номинальной? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

9. Каким будет напряжение генератора, если отдельные катушки полюсов неправильно соединены между собой? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

10. Каким будет напряжение генератора при междувитковом соединении или коротком замыкании в одной или нескольких катушках параллельной обмотки возбуждения? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

11. Опишите подробно в рабочей тетради процесс, происходящий в генераторе при холостом ходе и при нагрузке в случае неправильной полярности добавочных полюсов.

12. Что произойдет, если у генератора смешанного возбуждения последовательная обмотка включена неправильно? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

13. Что произойдет, если из-за нарушения изоляции параллельная обмотка или регулятор возбуждения соединены с корпусом? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

14. Что произойдет, если у генератора параллельного возбуждения щетки сдвинуты с нейтрали вперед по направлению вращения машины? Подробный ответ запишите в рабочую тетрадь.

### **КРАТКИЕ ОТВЕТЫ – ПОДСКАЗКИ**

1. Увеличивается ток возбуждения. Все катушки нагреваются равномерно, генератор при номинальной частоте вращения дает слишком высокое напряжение.

2. Часть катушек шунтируется, и ток возбуждения увеличивается. Некоторые катушки сильно нагреваются, часть катушек остается холодной. Щетки искрят. Якорь нагревается.

3 – 7. Магнитная стрелка, поднесенная к полюсным башмакам, показывает правильную полярность машины, но (даже после намагничивания машины) генератор не возбуждается (к вопросам 3 – 7).

4. Действие самовозбуждения машины противоположно действию остаточного магнетизма.

7. Сопротивление цепи возбуждения слишком велико (выше критического).

8 – 10. Генератор дает напряжение ниже номинального.

11. Генератор при холостом ходе дает нормальное напряжение; при нагрузке генератора напряжение его сильно падает и обычно сопровождается сильным искрением щеток.

12. Действие магнитного поля последовательной обмотки противоположно действию поля параллельной обмотки. Генератор при холостом ходе дает нормальное напряжение; при нагрузке генератора напряжение его сильно падает и обычно сопровождается сильным искрением щеток.

13. Происходит ослабление поля. Отключенный от сети генератор дает нормальное напряжение; щетки не искрят. При включении генератора в сеть напряжение падает, несмотря на нормальную частоту вращения. Падение напряжения обычно сопровождается искрением щеток.

14. Обмотка якоря создает продольно действующую МДС, ослабляющую основное поле, создаваемое параллельной обмоткой. Наличие добавочных полюсов приводит к тому, что при сдвиге щеток с нейтрали в направлении вращения усиливается размагничивание машины. Генератор параллельного возбуждения не возбуждается. Он перемагнитился (размагнитился).

## **7.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ**

Исходные данные для решения задач находят по табл. 7.6, 7.7.

В табл. 7.6 представлены номинальные значения частоты вращения и напряжения машины в генераторном режиме для заданного варианта. Если напряжение и частота вращения генератора, взятые из

табл. 7.6, не равны соответственно 230 В и 1500 об/мин, то номинальные данные рассчитывают согласно указаниям по определению исходных данных. В табл. 7.7 приведены исходные номинальные данные машины при частоте вращения 1500 об/мин и напряжении в генераторном режиме 230 В.

Таблица 7.6

Параметры	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная частота вращения $n_H$ , об/мин	750	1000	1500	2200	3000	750	1000	1500	2200	3000
Номинальное напряжение генератора $U_H$ , В	230	230	230	230	230	115	115	115	115	115

Пересчет номинальных данных проводится в следующей последовательности: по предпоследней цифре номера зачетной книжки определяют по табл. 7.6 заданные частоту вращения и напряжение; по последней цифре находят в табл. 7.7 вариант исходных номинальных данных.

Пересчет исходных данных проводится по следующим соотношениям:

а) номинальная мощность, кВт,  $P_H = P_{ни} \cdot \frac{n_H}{1500}$ ,

где  $P_{ни}$  – исходное значение мощности, равное указанному в табл. 7.7;

$n_H$  – номинальная частота вращения (см. табл. 7.6);

Таблица 7.7

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность, $P_{ни}$ , кВт	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	45	55
Ток возбуждения при холостом ходе, $I_{f0H}$ , А	0,8	0,9	0,95	1,0	1,07	1,5	1,7	2,2	2,8	3,2
Реакция якоря при номинальном токе якоря в	0,1	0,11	0,12	0,18	0,19	0,25	0,35	0,4	0,45	0,5

масштабе тока возбуждения, $I_{fai}$ , А										
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Окончание табл. 7.7

Параметры	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сопротивление обмотки якоря, $R_{ai}$ , Ом	0,55	0,34	0,2	0,14	0,1	0,09	0,06	0,65	0,04	0,03
Сопротивление обмотки добавочных полюсов, $R_{di}$ , Ом	0,23	0,13	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,016	0,015	0,01
Сопротивление обмотки возбуждения, $R_{fi}$ , Ом	165	135	120	115	110	75	65	50	45	35

б) ток возбуждения при холостом ходе

$$I_{f0} = I_{f0и} \cdot \left( \frac{230}{U_H} \right),$$

где  $I_{f0и}$  – исходное значение тока возбуждения (табл. 7.7);  $U_H$  – номинальное напряжение в режиме генератора (см. табл. 7.6);

в) реакция якоря при номинальном токе якоря в масштабе тока возбуждения

$$I_{fa} = I_{fai} \left( \frac{230}{U_H} \right);$$

где  $I_{fai}$  – исходное значение реакции якоря (см. табл. 7.7);

г) сопротивление обмотки якоря

$$R_a = R_{ai} \left( \frac{1500}{n_H} \cdot \frac{U_H}{230} \right)^2,$$

где  $R_a$  – исходное значение сопротивления обмотки якоря (см. табл. 7.7);

д) сопротивление обмотки добавочных полюсов

$$R_{д} = R_{ди} \left( \frac{U_{н}}{230} \right)^2,$$

где  $R_{ди}$  – исходное значение сопротивления обмотки добавочных полюсов (см. табл. 7.7);

е) сопротивление обмотки возбуждения

$$R_{f} = R_{фи} \left( \frac{U_{н}}{230} \right)^2,$$

где  $R_{фи}$  – исходное значение сопротивления обмотки возбуждения (см. табл. 7.7).

**Пример:** Номер зачетной книжки 158196 соответствует генератору со следующими данными: скорость вращения  $n_{н} = 3000$  об/мин, напряжение  $U_{н} = 115$  В;

$$P_{н} = 22 \cdot \frac{3000}{1500} = 44 \text{ кВт}; \quad I_{f0} = 1,7 \cdot \frac{230}{115} = 3,4 \text{ А};$$

$$I_{fa} = 0,35 \cdot \frac{230}{115} = 0,7 \text{ А}; \quad R_a = 0,06 \left( \frac{1500 \cdot 115}{3000 \cdot 230} \right)^2 = 0,00375 \text{ Ом};$$

$$R_{д} = 0,02 \left( \frac{1500 \cdot 115}{3000 \cdot 230} \right)^2 = 0,00125 \text{ Ом}; \quad R_f = 65 \left( \frac{115}{230} \right)^2 = 16,25 \text{ Ом}.$$

После проведения расчетов результаты заносят в табл. 7.8.

Таблица 7.8

### Номинальные данные генератора

$P_{н}$ кВт	$n_{н}$ об/мин	$U_{н}$ В	$I_{f0}$ А	$I_{fa}$ А	$R_a$ Ом	$R_{д}$ Ом	$R_f$ Ом

**Задача 7.3.** Построить характеристику холостого хода и характеристический треугольник, соответствующий номинальному режиму генератора. Определить ток возбуждения и сопротивление реостата в

цепи возбуждения генератора параллельного возбуждения при номинальной нагрузке.

*Методические указания к контрольной задаче 7.3.* При решении задачи исходные данные находят по табл. 7.8.

Для построения характеристики холостого хода следует использовать данные типичной характеристики холостого хода в относительных единицах, приведенные в табл. 7.9.

Таблица 7.9

$I_f^*$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E^*$	0,05	0,75	1,0	1,12	1,20	1,26	1,30	1,33

Характеристику холостого хода следует построить в абсолютных единицах. Пересчет данных осуществляют по формулам

$$I_f = I_f^* \cdot I_{f0}; \quad E = E^* \cdot U_H.$$

Результаты вычислений занести в табл. 7.10.

Таблица 7.10

$I_B, A$								
$E, B$								

Номинальный ток якоря определяют по выражению

$$I_{aH} = \frac{P_H}{U_H} \cdot 10^3 A.$$

Характеристику холостого хода, как и другие характеристики, строят на миллиметровой бумаге в удобном для построения масштабе. Масштаб наносится по осям координат начиная с нуля. На концах осей координат с нанесенным масштабом стрелки не ставят, а указывают наименование и единицу измерения откладываемого параметра. Точки характеристики наносят строго по расчету, а сама характеристика проводится по лекалу.

По заданному напряжению  $U_H$  генератора и найденному номинальному току возбуждения  $I_{fH}$  определяют сопротивление цепи возбуждения  $R_{цв}$ , а затем и сопротивление реостата в цепи:  $r_{рег} = R_{цв} - R_f$ .

**Задача 7.4.** Графически, с помощью характеристики холостого хода (табл. 7.10) и характеристического треугольника построить внешнюю и регулировочную характеристики генератора независимого возбуждения. Определить номинальное изменение напряжения.

Внешнюю характеристику для случая независимого возбуждения следует построить при неизменном токе возбуждения  $I_{fH}$ .

Внешние характеристики должны быть построены полностью от режима холостого хода до режима короткого замыкания, и при этом следует рассчитать не менее 4 – 6 точек характеристики (обязательно рассчитать режимы холостого хода, номинальный, короткого замыкания).

**Задача 7.5.** В табл. 7.10 приведена характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения. Построить внешнюю характеристику генератора. Определить номинальное изменение напряжения.

Внешнюю характеристику для случая параллельного возбуждения следует построить при неизменном сопротивлении цепи возбуждения  $R_{цв}$ , определенном в задаче 7.3. При построении внешней характеристики необходимо рассчитать критический режим.

При определении тока короткого замыкания генератора параллельного возбуждения следует исходить из выражения  $I_{кз} = \frac{E_0 - \Delta U_{щ}}{R_a + R_d}$ .

Приведенное соотношение не учитывает реакции якоря, поэтому в некоторых вариантах  $I_{кз}$  получается неоправданно большой. При получении  $I_{кз} > I_{ан}$  следует определить ток короткого замыкания графически. Для этого нужно продолжить полученную ранее часть внешней характеристики до пересечения с осью тока якоря.

## Глава 8. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 8.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕМЫ

1. Назначение и область применения двигателей постоянного тока.
2. Уравнение электрического равновесия ДПТ.
3. Потери энергии в двигателях постоянного тока и коэффициент полезного действия.
4. Энергетическая диаграмма двигателя.
5. Основные уравнения, описывающие работу двигателей постоянного тока.
6. Проблемы, связанные с пуском и остановкой двигателя постоянного тока.
7. Расчет сопротивлений секций пускового реостата двигателя с независимым возбуждением.
8. Уравнение скоростной характеристики ДПТ с параллельным возбуждением.
9. Уравнение механической характеристики ДПТ с параллельным и последовательным возбуждением.
10. Реостатное, полюсное и якорное управление ДПТ с параллельным возбуждением.
11. Изменение направления вращения вала двигателя постоянного тока.
12. Торможение двигателей постоянного тока. Динамическое торможение двигателя. Торможение противовключением. Рекуперативное торможение.

## **8.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ**

В результате изучения темы студенты должны

**ПОМНИТЬ:**

– назначение и область применения двигателей постоянного тока; основные физические законы, позволяющие преобразовывать электрическую энергию в механическую энергию постоянного тока; основные характеристики двигателей;

**ОБЪЯСНЯТЬ:**

– принцип действия двигателей постоянного тока; причины изменения скорости вращения двигателя при увеличении нагрузки на валу;

физические явления, служащие причинами потерь энергии в двигателе;  
физические основы регулирования скорости вращения вала двигателя;

УМЕТЬ:

– выбирать двигатель по паспортным данным для использования в конкретных условиях эксплуатации; проводить испытания двигателя с целью определения его реальных параметров; выявлять причины отклонения от нормального режима работы и определять пути устранения этих причин; прогнозировать эффективность работы двигателя в заданных условиях; планировать профилактическое обслуживание электрической машины.

Вы также должны ответить, например, на следующие вопросы:

1. Что такое номинальные параметры двигателя постоянного тока?
2. Почему при прямом пуске двигателя постоянного тока имеет место большой всплеск тока двигателя?
3. Каково назначение пускового реостата двигателя постоянного тока?
4. Почему при изменении в некоторых пределах напряжения сети питания двигателя с параллельным возбуждением скорость вращения вала двигателя изменяется незначительно?
5. Почему необходимо контролировать целостность цепи возбуждения двигателя с параллельным возбуждением?
6. Почему необходимо контролировать силу тока обмотки возбуждения двигателя с параллельным возбуждением?
7. Почему не допускают работу двигателя последовательного возбуждения в режиме, близком к режиму холостого хода?
8. Что такое полюсное управление двигателем?
9. Каковы физические основы регулирования скорости вращения вала при якорном управлении двигателем?
10. Каковы физические основы и недостатки реостатного управления двигателем?
11. В чем отличие и каковы особенности двигателей с различными способами создания магнитного потока двигателя?
12. Почему при изменении полярности питающей сети двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением направление вращения вала не изменяется?

13. С какой целью пусковой реостат делают секционированным?

### 8.3. ЗАДАНИЯ ПО РАБОТЕ С КНИГОЙ

Исходные данные задания определяются с помощью табл. 4.1 по номеру  $N_B$ , который студент узнает у преподавателя. При этом номера учебных пособий, указанных в табл. 4.1, соответствуют номерам источников, приведенных в списке рекомендованной литературы. Все задания выполняются в рабочей тетради студента и предъявляются преподавателю для проверки.

1. Студенты, получившие варианты задания с 1 по 35, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для первого вопроса **главы 8** и десятого вопроса **главы 8**, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для третьего вопроса **главы 8** и девятого вопроса **главы 8**.

Студенты, получившие варианты задания с 36 по 70, составляют тезаурус и изображают схему типа «паучок» для четвертого вопроса **главы 8** и двенадцатого вопроса **главы 8**, а также составляют вопросы для самоконтроля и изображают схему типа «генеалогическое дерево» для седьмого вопроса **главы 8** и восьмого вопроса **главы 8**.

2. Необходимо изложить в рабочей тетради основные мысли текста из книг, относящихся к вашему варианту (по образцу табл. 4.2).

### 8.4. ТИПОВАЯ ЗАДАЧА ТЕМЫ

Машина постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 8.1), работающая в режиме двигателя, имеет номинальное напряжение  $U_H = 220$  В и при номинальной нагрузке потребляет ток  $I_{\text{ном}} = 17$  А. Номинальная мощность двигателя 3300 Вт. В режиме холостого хода ток якоря  $I_{a0} = 1$  А. Номинальная частота вращения  $n_{\text{ном}} = 1045$  об/мин, сопротивление цепи якоря  $R_a = 1$  Ом, сопротивление цепи возбуждения  $R_a = 180$  Ом. Номинальный ток возбуждения  $I_{fH} = 1,1$  А. Магнитные и механические потери принимаются равными и постоянными при всех режимах работы двигателя. Необходимо:

- определить номинальный вращающий момент  $M_{\text{ном}}$  и номинальный КПД;
- рассчитать сопротивление секций пускового реостата при условии, что значение тока при пуске двигателя не должно превышать двойное значение номинального тока;
- считая механическую характеристику прямой линией, проходящей через точки, соответствующие скорости идеального холостого хода и пускового момента, и пренебрегая размагничивающим действием реакции якоря, построить естественную механическую характеристику и семейство механических характеристик при пуске двигателя с помощью пускового реостата;
- определить частоту вращения якоря при уменьшении тока возбуждения на 30% от номинального значения при номинальном моменте на валу;
- определить частоту вращения вала двигателя при номинальном моменте на валу и при снижении напряжения на якоре двигателя в два раза;
- пренебрегая мощностью цепи возбуждения, построить график зависимости КПД двигателя от выходной мощности двигателя.

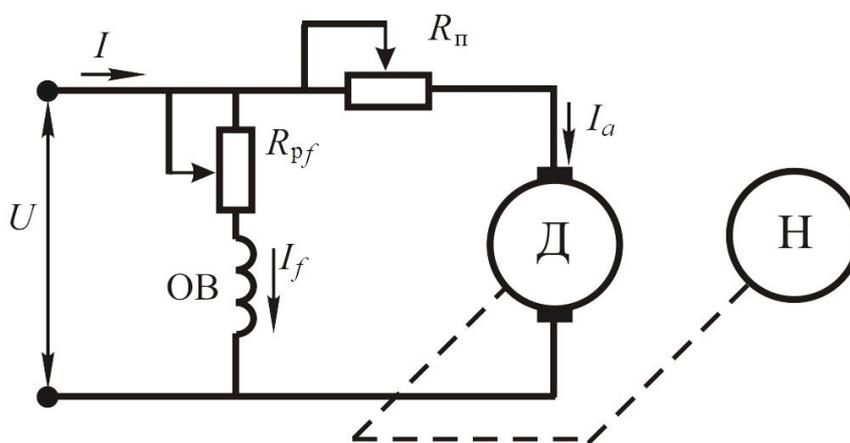


Рис. 8.1

*Решение.*

- 1) Определить номинальный вращающий момент  $M_{\text{ном}}$  и номинальный КПД.

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\Omega} = \frac{P_{2H} \cdot 30}{\pi \cdot n_{ном}} = \frac{3300 \cdot 30}{3,14 \cdot 1025} = 30,74 (\text{Н} \cdot \text{м})$$

Для вычисления номинального значения КПД необходимо вычислить постоянные потери мощности и переменные потери мощности двигателя.

Постоянные потери двигателя определяются мощностью, потребляемой двигателем в режиме холостого хода.

$$P_{пост} = U_H I_{a0} = 220 \cdot 1 = 220 \text{ Вт.}$$

Переменные потери определяются потерями в сопротивлении цепи якоря при номинальной нагрузке.

Определим номинальный ток якоря.  $I_{ан} = I_H - I_{fH} = 17 - 1,1 = 15,9 \text{ А.}$

$$P_{пер} = R_a I_{ан}^2 = 1 \cdot 15,9^2 = 253 \text{ Вт.}$$

$$\eta_H = P_2 / (P_2 + P_{пер} + P_{пост}) = 3300 / (3300 + 220 + 253) = 0,874.$$

2) Рассчитать сопротивление секций пускового реостата при условии, что значение тока при пуске двигателя не должно превышать двойное значение номинального тока.

В общем случае электрическая схема цепи якоря машины с включенным секционированным пусковым реостатом выглядит так, как она представлена на рис. 8.2. Количество секций пускового реостата определяется в процессе вычислений.

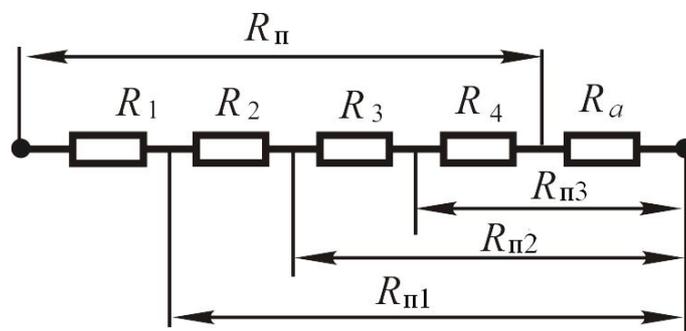


Рис. 8.2

По условию задачи пусковой ток не должен превышать двойное значение номинального тока, поэтому при подключении двигателя с неподвижным ротором к сети ток якоря двигателя определится из формулы

$$U_H = (R_{п} + R_a) 2I_{ан},$$

где  $R_{п} = U_H / 2I_{ан} - R_a = 220 / (2 \cdot 15,9) - 1 = 5,9 \text{ Ом.}$

При полностью введенном пусковом реостате установившийся режим наступит тогда, когда в обмотке якоря будет наведена ЭДС,

значение которой можно вычислить из уравнения электрического равновесия

$$U_H = E_1 + (R_{\Pi} + R_a)I_H .$$

$$\text{Тогда } E_1 = U_H - (R_{\Pi} + R_a)I_H = 220 - (5,9 + 1)15,9 = 109,7 \text{ В.}$$

Следующий этап пуска заключается в уменьшении сопротивления пускового реостата путем отключения первой секции. При этом ток якоря не должен увеличиться больше, чем в два раза, т.е.

$$U_H = E_1 + R_{\Pi 1}2I_H .$$

$$\text{Отсюда } R_{\Pi 1} = (U_H - E_1)/2I_H = (220 - 109,7)/(2 \cdot 15,9) = 3,47 \text{ Ом.}$$

Определяем новое значение ЭДС якоря из условия электрического равновесия при сопротивлении реостата, равном  $R_{\Pi 1}$ .

$$E_2 = U_H - R_{\Pi 1}I_{aH} = 220 - 3,47 \cdot 15,9 = 164,8 \text{ В.}$$

$$\text{Вычисляем: } R_{\Pi 2} = (U_H - E_2)/2I_{aH} = (220 - 164,8)/(2 \cdot 15,9) = 1,74 \text{ Ом.}$$

Аналогично для следующей ступени  $E_3 = U_H - R_{\Pi 1}I_{aH} = 220 - 1,74 \cdot 15,9 = 192,3 \text{ В.}$

$$R_{\Pi 3} = (U_H - E_3)/2I_{aH} = (220 - 192,3)/(2 \cdot 15,9) = 0,87 \text{ Ом.}$$

Полученное сопротивление меньше сопротивления цепи якоря, поэтому отпадает необходимость в дальнейшем секционировании пускового реостата.

Пусковой реостат должен иметь сопротивление 5,9 Ом. При этом реостат должен быть разбит на две секции (рис. 8.2).

$$R_1 = (R_{\Pi} + R_a) - R_{\Pi 1} = (5,9 + 1) - 3,47 = 3,43 \text{ Ом.}$$

$$R_2 = R_{\Pi} - R_1 = 5,9 - 3,43 = 2,47 \text{ Ом.}$$

3) Построить естественную механическую характеристику и семейство механических характеристик при пуске двигателя с помощью пускового реостата.

Для построения механической характеристики необходимо вычислить скорость идеального холостого хода.

Уравнение электрического равновесия двигателя, работающего в номинальном режиме,

$$U_H = E_p + R_a I_{aH} ,$$

где  $E_p$  – реальная ЭДС двигателя, работающего в номинальном режиме.

$$E_p = U_H - R_a I_{ан} = 220 - 15,9 = 204,1 \text{ В.}$$

Учитывая то, что ЭДС пропорциональна скорости вращения, получаем:

$$E_p = C_e n \Phi \text{ и } C_e \Phi = E_p / n = 204,1 / 1045 = 0,2.$$

Скорость идеального холостого хода  $n_{0н}$  при номинальном напряжении равняется  $n_0 = U_H / C_e \Phi = 220 / 0,2 = 1100$  об/мин.

Для вычисления пускового момента при отключенном пусковом реостате необходимо определить коэффициент пропорциональности между током якоря и моментом на валу двигателя.

$$\text{Номинальный механический момент } M_H = C_M \Phi I_{ан} = P_2 / \Omega = 30 P_2 / n \pi = 30 \cdot 3300 / 1025 \pi = 30,3 \text{ Нм. Тогда } C_M \Phi = M_H / I_{ан} = 30,3 / 15,9 = 1,9.$$

Пусковой механический момент двигателя без пускового реостата определится произведением постоянного коэффициента на пусковой ток. При отсутствии пускового реостата пусковой ток  $I_{п1} = U_H / R_a = 220 / 1 = 220$  А. Тогда пусковой момент равен  $M_{п1} = C_M \Phi I_{п1} = 1,9 \cdot 220 = 418$  Нм.

$$\text{Пусковой ток при введенном пусковом реостате } I_{п1} = U_H / (R_{п1} + R_a) = 220 / (5,9 + 1) = 31,8 \text{ А.}$$

Пусковой ток при введенной второй секции пускового реостата

$$I_{п2} = U_H / (R_2 + R_a) = 220 / (2,47 + 1) = 63,4 \text{ А.}$$

Пусковые моменты при найденных токах

$$M_{п1} = C_M \Phi \cdot I_{п1} = 1,9 \cdot 31,8 = 60,42 \text{ Нм.}$$

$$M_{п2} = C_M \Phi \cdot I_{п2} = 1,9 \cdot 63,4 = 120,4 \text{ Нм.}$$

Общий вид уравнения механической характеристики  $n = n_0 - k \cdot M$ , где  $k = n_0 / M_{п1}$ .

Рассчитаем коэффициенты наклона механических характеристик:

$$k = n_0 / M_{п1} = 1100 / 418 = 2,63;$$

$$k_1 = n_0 / M_{п1} = 1100 / 60,42 = 18,2;$$

$$k_2 = n_0 / M_{п2} = 1100 / 120,4 = 9,1.$$

Запишем уравнение естественной механической характеристики:

$$n = 1100 - 2,63M.$$

Уравнение механической характеристики при введенном пусковом реостате

$$n_1 = 1100 - 18,2M.$$

Уравнение механической характеристики при введенной второй секции пускового реостата

$$n_2 = 1100 - 9,1M.$$

Частота вращения вала ДПТ при номинальном моменте, определенная по уравнениям механических характеристик:

$$n_H = 1045 \text{ об/мин};$$

$$n_{H1} = 548 \text{ об/мин};$$

$$n_{H2} = 824 \text{ об/мин}.$$

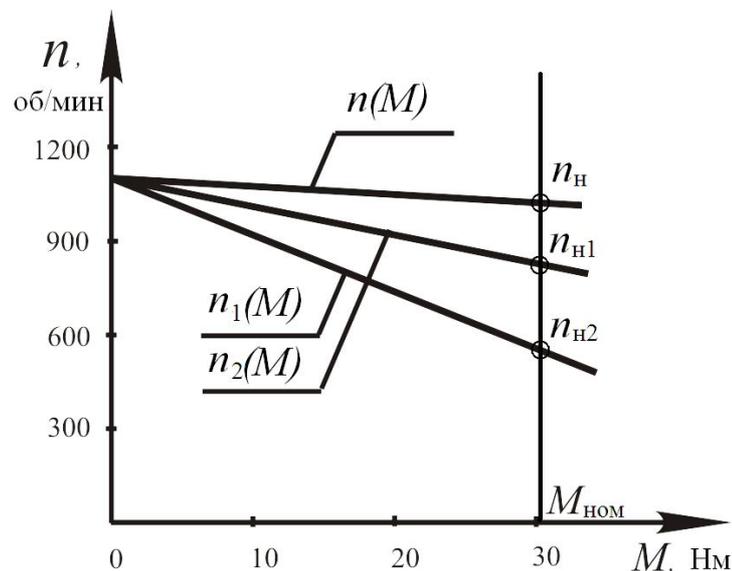


Рис. 8.3

Механические характеристики представлены на рис. 8.3.

4) Определить частоту вращения якоря при уменьшении тока возбуждения на 30% от номинального значения при номинальном моменте на валу.

Изменение тока возбуждения приводит к изменению механической характеристики. Скорость идеального холостого хода обратно пропорциональна магнитному потоку или току возбуждения. При номинальном токе возбуждения скорость идеального холостого хода равна 1100 об/мин. При уменьшении тока возбуждения на 30 процентов скорость идеального холостого хода будет равной  $n_{01} = n_0/0,7 = 1100/0,7 = 1571$  об/мин.

Ранее вычислен пусковой момент при отсутствии пускового реостата в цепи якоря и номинальном токе возбуждения  $M_{п} = 418$  Нм. Пусковой момент при уменьшенном токе возбуждения составит  $M_{п1} = 0,7 \cdot 418 = 292,6$  Нм.

Коэффициент наклона механической характеристики  $k = n_0/M_{п1} = 1571/418 = 5,37$ .

Уравнение механической характеристики в этом случае:

$$n = 1571 - 5,37M.$$

Частота вращения вала ДПТ, соответствующая номинальному моменту,  $n = 1571 - 5,37 \cdot 30,3 = 1408$  об/мин.

5) Определить частоту вращения вала двигателя при номинальном моменте на валу и при снижении напряжения на якоре двигателя в два раза.

Изменение напряжения на якоре при сохранении тока возбуждения и момента нагрузки двигателя приведет к уменьшению частоты вращения вала. Ток якоря останется равным номинальному току. ЭДС обмотки якоря станет равной  $E_1 = 0,5 \cdot U_n - R_a I_{ан} = 0,5 \cdot 220 - 1 \cdot 15,9 = 94,1$  В.

Электрическое равновесие наступит при частоте вращения, равной  $n_1 = E_1/C_e \Phi = 94,1/0,2 = 470$  об/мин.

6) Построить график зависимости КПД двигателя от выходной мощности двигателя. Мощностью цепи возбуждения пренебречь.

Постоянные потери определяются мощностью двигателя в режиме холостого хода, поэтому  $P_{пост} = U_n \cdot I_0 = 220 \cdot 1 = 220$  Вт. Переменные потери пропорциональны квадрату тока якоря двигателя.  $P_{пер} = R_a I_a^2$ .

Для определения  $P_2$  при построении графика используем уравнение естественной механической характеристики двигателя. Результаты расчетов записываем в табл. 8.1.

На рис. 8.4 представлен график зависимости КПД двигателя от выходной мощности.

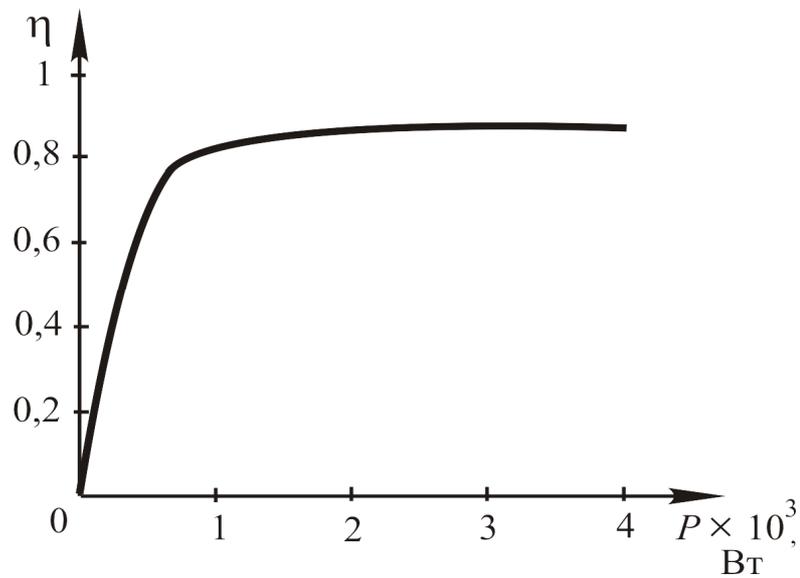


Рис. 8.4

Таблица 8.1

$M$ , Нм	0	50	100	150	200	250	300	350
$n$ , об/мин	1100	1087	1074	1061	1047	1034	1021	1008
$I_a$ , А	1	3,632	6,263	8,895	11,526	14,158	16,789	19,421
$P_{\text{пер}}$ , Вт	1	6,92	27,7	62,327	110,8	173	249	339
$P_2$ , Вт	0	568	1124	1665	2193	2706	3206	3692
$P_1$ , Вт	220	795	1372	1947	2523	3099	3676	4252
$\eta$	0	0,71	0,82	0,855	0,87	0,87	0,87	0,868

## 8.5. ТЕЗАУРУС ПОНЯТИЙ ТЕМЫ

### **Двигатели постоянного тока.**

Двигателями постоянного тока называют электрические машины, преобразующие электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию вращения.

Для правильного понимания принципа действия двигателей постоянного тока рассмотрим рис. 8.5, на котором схематично изображен поперечный разрез машины с основными элементами, участвующими в процессе преобразования энергии.

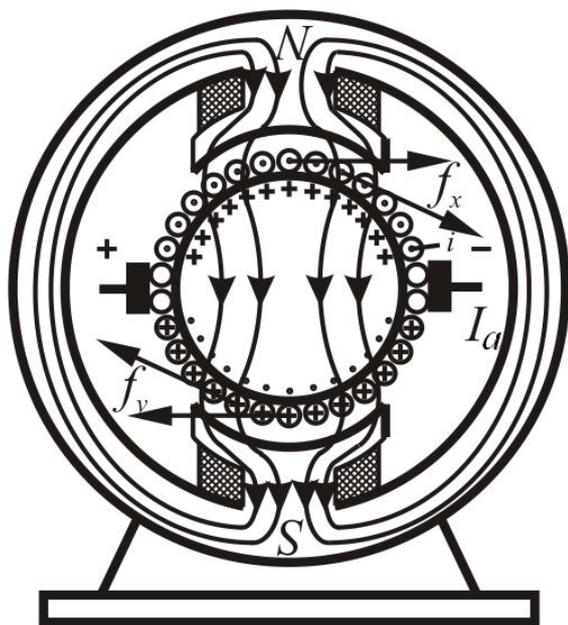


Рис. 8.5

При подключении машины к сети постоянного тока в обмотке возбуждения, расположенной на главных полюсах машины, будет протекать ток, который создаст магнитный поток в магнитной цепи, состоящей из станины, главных полюсов, воздушного зазора и якоря машины. Величина магнитного потока зависит от конструкции и материала магнитопровода, а также от силы тока возбуждения. В воздушном зазоре машины будет создано магнитное поле, представленное магнитными силовыми линиями. Обмотка якоря также подключена к сети постоянного тока, и по её проводникам протекает ток. Она представлена на рисунке проводниками, распределенными по поверхности якоря в воздушном зазоре. Направление тока в проводниках показано на рисунке. На каждый проводник якорной обмотки действует механическая сила  $f_{\delta} = B_{\delta} l i$ , пропорциональная индукции магнитного поля  $B_x$ , длине проводника  $l$  и силе тока в нем  $i$ .

Направления сил  $f_x$ , действующих на проводники, находящиеся под северным и южным полюсами, показаны на рисунке стрелками. Направления сил можно принять совпадающими с направлениями касательных к поверхности якоря в местах расположения проводников.

Суммарное взаимодействие токов всех проводников обмотки якоря с магнитным полем машины создает механический момент на валу двигателя  $M = C_1 I_a \Phi$ , где  $C_m$  – постоянная, зависящая от конструкции машины,  $I_a$  – ток якоря,  $\Phi$  – магнитный поток.

Под действием механического момента якорь машины начинает вращаться с частотой  $n$ . Одновременно в каждом проводнике якоря,

перемещающемся в магнитном поле машины, наводится ЭДС  $e_x = B_x lv$ , где  $v$  – линейная скорость перемещения проводника в магнитном поле. Суммарная электродвижущая сила всей якорной обмотки может быть определена из уравнения  $E = C_e n \Phi$ , где  $C_e$  – постоянная, зависящая от конструкции машины.

Направления электродвижущих сил проводников на рис. 8.5 показаны точками и крестиками, расположенными рядом с проводниками. Следует обратить внимание на несовпадение направлений токов и ЭДС проводников. Поэтому ЭДС якоря в двигателях называют иногда против-ЭДС, подчеркивая то, что электродвижущая сила обмотки якоря противодействует приложенному напряжению и току якоря (рис. 8.6). На рис. 8.6 слева представлена электрическая схема цепи питания якоря двигателя постоянного тока.

На рис. 8.6  $E_{\text{в}}$  – ЭДС внешнего источника питания,  $R_{\text{в}}$  – внутреннее сопротивление источника. С электрической точки зрения якорь двигателя представляет собой ЭДС  $E$ , направление которой не совпадает с направлением тока обмотки якоря, и резистора  $R$ , сопротивление которого равно сопротивлению провода обмотки якоря. Цепь обмотки возбуждения на рисунке не показана.

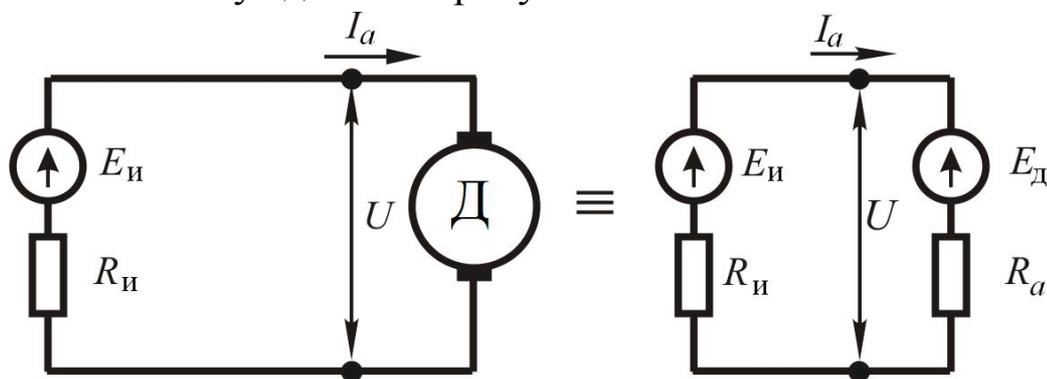


Рис. 8.6

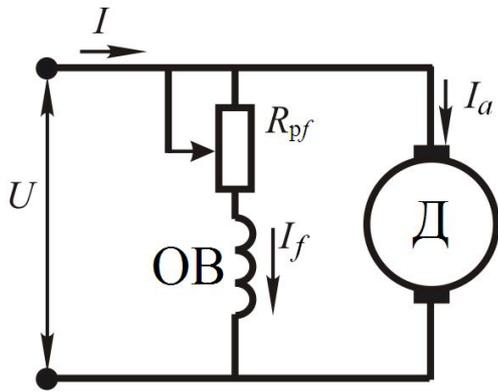


Рис. 8.7

**Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением** – двигатель, обмотка возбуждения которого включается параллельно цепи якоря (рис. 8.7).

**Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением** – двигатель, обмотка возбуждения которого включается последовательно с обмоткой якоря (рис. 8.8).

**Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока.**

Механическая характеристика двигателя постоянного тока, полученная при номинальном напряжении на якоре и номинальном токе возбуждения двигателя, называется естественной механической характеристикой.

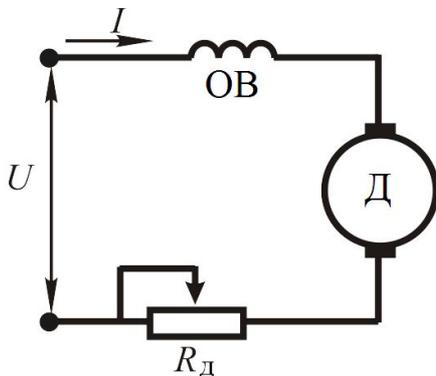


Рис. 8.8

Общий вид естественной механической характеристики показан на рис. 8.9.

**Жесткая механическая характеристика двигателя.**

Механическая характеристика называется жесткой, если при изменении механического момента от нулевого значения до номинального значения частота вращения изменяется незначительно. Двигатели с параллельным возбуждением при отсутствии дополнительного реостата в цепи якоря имеют жесткую механическую характеристику (рис. 8.9).

Механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением описывается уравнением  $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a M}{C_e C_m \Phi^2}$ .

Уравнение состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое не зависит от момента, а второе слагаемое прямо пропорционально механическому моменту  $M$ .

В режиме идеального холостого хода электромагнитный момент двигателя равен нулю  $M_{эм} = 0$  и при номинальном напряжении якорь вращается с частотой  $n_0 = \frac{U_H}{C_e \Phi}$ .

$$n_0 = \frac{U_H}{C_e \Phi}.$$

Это первая точка механической характеристики.

Положение другой точки определяется из условий пуска двигателя. При подключении двигателя в сеть в начальный момент времени из-за инерционности якоря частота вращения равна нулю  $n = 0$ . Противо-ЭДС обмотки якоря тоже равна нулю, и тогда приложенное напряжение падает только на сопротивлении якорной цепи. Ток якоря, называемый в этом случае **пусковым током**  $I_{яп}$ , достигает больших величин из-за малости  $R_a$  (сила пускового тока определяется из уравнения  $I_{ап} = \frac{U}{R_a}$ ).

Механический момент, развиваемый двигателем в этом случае, называют **пусковым моментом**  $M_{п}$ , и его величина определяется формулой

$$M_{п} = C_m I_{ап} \Phi = C_m \frac{U}{R_a} \Phi.$$

Общий вид механической характеристики при изменении значений момента от нуля до пускового  $M_n$  показан на рис. 8.10.

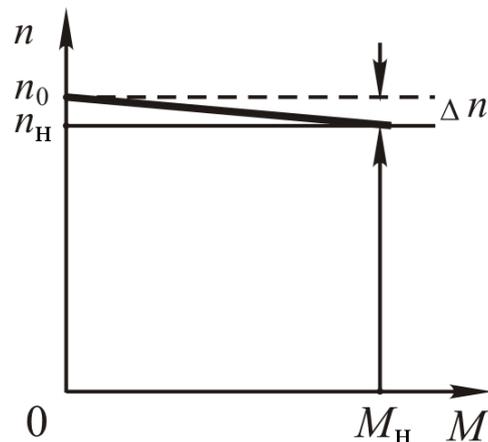


Рис. 8.9

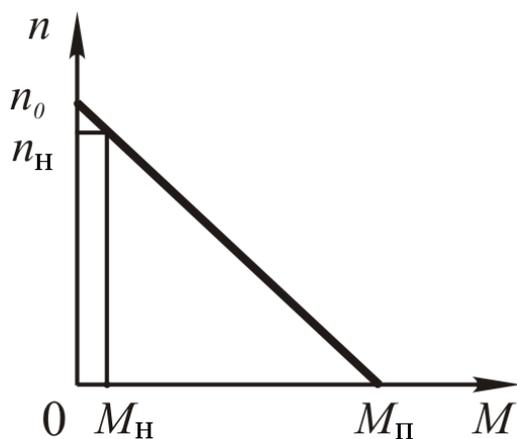


Рис. 8.10

Двигатели с параллельным возбуждением имеют пусковой момент в  $10 \div 20$  раз больше номинального, поэтому рабочая часть механической характеристики, ограниченная режимом холостого хода ( $M=0$ ) и номинальным значением момента на валу  $M_H$ , занимает лишь начальную часть полной характеристики (рис. 8.10), в пределах которой частота вращения изменяется незначительно.

Такая механическая характеристика, когда при изменении механического момента от нулевого значения до номинального значения частота вращения изменяется незначительно, называется жесткой (рис. 8.9). Величина  $\Delta n = n_0 - n_H$  весьма невелика.

### **Искусственная механическая характеристика постоянного тока.**

Все механические характеристики двигателя постоянного тока, полученные при условиях, отличных от условий, при которых получают естественную механическую характеристику, называют искусственными механическими характеристиками.

### **Классификация двигателей постоянного тока.**

Процесс разделения двигателей по отличительным признакам называют классификацией.

Примером классификации двигателей постоянного тока является классификация по способам создания магнитного поля двигателей или по способам возбуждения двигателя.

Один из простейших способов создания магнитного поля двигателей постоянного тока является использование постоянных магнитов в качестве источника этого поля. Однако такой способ весьма дорогостоящий и применяется в машинах малой мощности. Магнитное поле машины может быть получено за счет использования электромагнитов, для чего в магнитной цепи располагается специальная обмотка, называемая обмоткой возбуждения. По этой обмотке пропус-

кается постоянный ток, за счет чего и создается магнитное поле машины. Одна или несколько обмоток возбуждения располагаются на главных полюсах машины, которые и формируют картину поля в воздушном зазоре машины. Для питания обмоток возбуждения могут использоваться независимые от основного источники питания. В этом случае машину называют машиной с независимым возбуждением. Условное обозначение машин приведено на рис. 8.11.

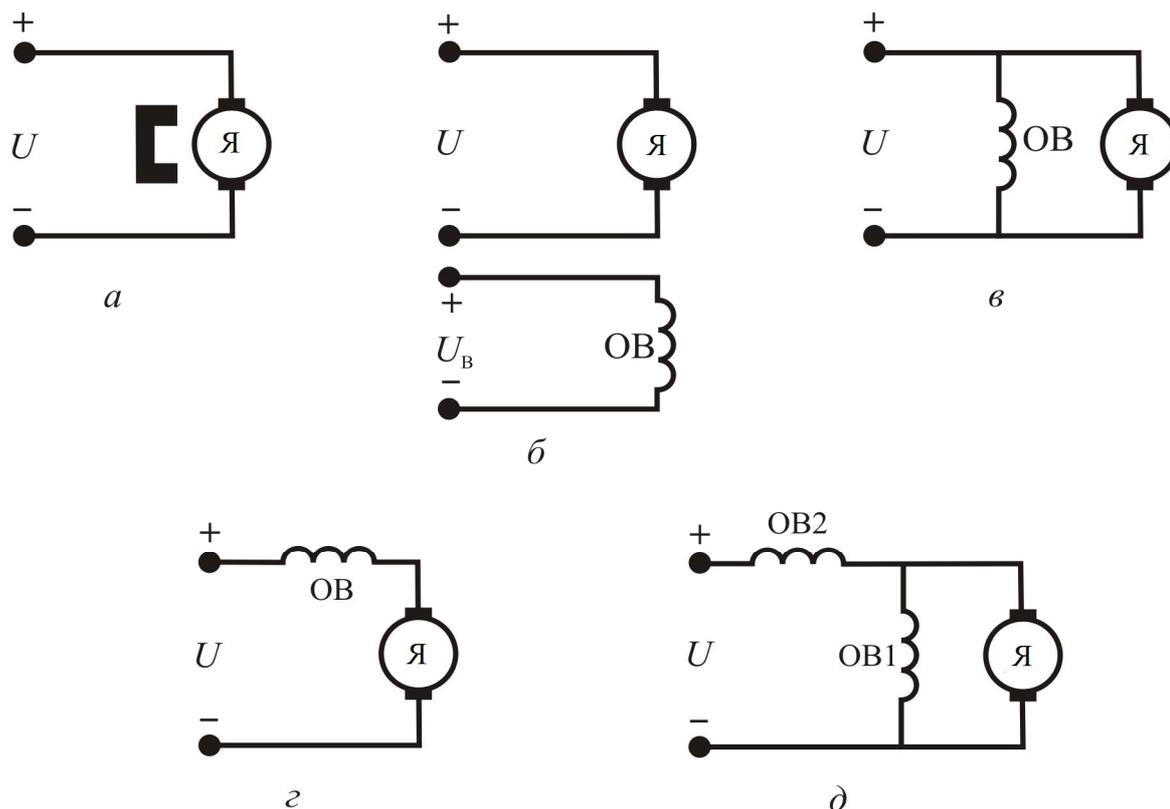


Рис. 8.11

Машины с независимым возбуждением подразделяют на машины с постоянными магнитами (рис. 8.11, *а*) и машины с обмоткой возбуждения, питаемой от независимого источника (рис. 8.11, *б*).

Машины с самовозбуждением подразделяются на машины с параллельным (рис. 8.11, *в*), последовательным (рис. 8.11, *г*) и смешанным возбуждением (рис. 8.11, *д*).

В случае смешанного возбуждения, когда используются последовательная и параллельная обмотки, намагничивающие силы обмоток могут совпадать или не совпадать по направлению в зависимости от способа соединения обмоток.

Если намагничивающие силы обмоток совпадают по направлению, то магнитный поток главных полюсов пропорционален сумме намагничивающих сил обмоток. Такие машины называют машинами со смешанным возбуждением с согласным включением обмоток. Если же обмотки создают магнитные потоки противоположного направления, то результирующий магнитный поток главных полюсов будет пропорционален разности намагничивающих сил обмоток возбуждения. Такой способ возбуждения называют смешанным со встречным включением обмоток.

### **Коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока.**

Коэффициентом полезного действия двигателя постоянного тока называют отношение механической мощности, отдаваемой двигателем нагрузке, к мощности, потребляемой двигателем от внешних источников электрической энергии. Этим коэффициентом оценивается эффективность работы двигателя постоянного тока, т.е. эффективность преобразования электрической энергии в механическую энергию, отдаваемую нагрузке. Часть энергии, потребляемой от внешних источников, рассеивается в самом двигателе.

При работе двигателя в номинальном режиме сопротивление цепи возбуждения определяется сопротивлением проводов обмотки возбуждения и сопротивлением реостата. В общем случае ток, протекающий в этой цепи, нагревает обмотку и провод регулировочного реостата. Таким образом, мы имеем дело с рассеиванием электрической энергии в этой цепи. Если сопротивление обмотки возбуждения обозначить  $R_{of}$ , а сопротивление регулировочного реостата  $R_{pf}$ , то полное сопротивление цепи возбуждения  $R_f$  определится из уравнения  $R_f = R_{pf} + R_{of}$ , а потери энергии в этой цепи можно вычислить по формуле вычисления мощности  $P_f = R_f I_f^2$  или  $P_f = U^2 / R_f$ .

Другая часть энергии теряется в якоре. Не вся электрическая энергия, потребляемая якорем, преобразуется в механическую энергию, прежде всего потому, что обмотка якоря обладает электрическим сопротивлением. Сопротивление проводников обмотки якоря в

реальных машинах достаточно мало, но и это малое сопротивление играет существенную роль в эффективности работы двигателя.

Электрическая энергия подводится к якорю с помощью щеточно-коллекторного устройства. Сопротивление коллекторных пластин, выполненных из меди, чрезвычайно мало, но сопротивление щеток и сопротивление контакта «щетке – коллекторные пластины» значительно. Прохождение тока по этим элементам приводит к дополнительным потерям электрической энергии. Общее сопротивление цепи якоря  $R_a$ , таким образом, равно сумме сопротивлений щеток  $R_{щ}$ , перехода «щетке – коллекторные пластины»  $R_k$  и проводов обмотки  $R_o$ . Следовательно,  $R_a = R_{щ} + R_k + R_o$ .

Потери в этих сопротивлениях называют потерями в цепи якоря.

Барaban якоря изготавливают из листовой электротехнической стали, которая является проводящим материалом. При работе двигателя якорь вращается в неподвижном магнитном поле, и это приводит к тому, что сталь якоря постоянно перемагничивается с частотой, кратной частоте вращения якоря. По причине изменения индукции магнитного поля и направления намагничивания стали в сердечнике якоря возникают вихревые токи. Оба явления связаны с потерями энергии, то есть с превращением электрической энергии в тепловую энергию, которая приводит к нагреву двигателя. Потери на перемагничивание и на вихревые токи называют потерями в стали. Индукция магнитного поля в статоре и главных полюсах не изменяется во времени, поэтому потери в магнитопроводах этих частей машины практически отсутствуют. Иногда отдельным пунктом рассматривают потери в пазовой части магнитопровода ротора.

Механическая часть конструкции машины вносит свой вклад в общий объем потерь энергии. В основном говорят о потерях в подшипниках, потерях, связанных с трением щеток о коллектор, и потерях в вентиляторе. Все эти потери связаны с преобразованием механической энергии в тепловую энергию. Мощность потерь, равную сумме мощностей потерь в подшипниках, вентиляторе и потерь, связанных с трением щеток о коллектор, называют механическими потерями  $P_{мех}$ .

Таким образом, потребляемая двигателем из сети электрическая энергия преобразуется:

- в механическую выходную энергию;
- в тепловую энергию цепи обмотки возбуждения;
- в тепловую энергию электрической цепи якоря;
- в тепловую энергию потерь в стали;
- в тепловую энергию механических потерь.

Энергетическое равновесие в двигателе постоянного тока описывается следующим уравнением:

$$P_1 = P_2 + P_a + P_{ст} + P_{мех} + P_f,$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая двигателем из сети;

$P_2$  – мощность полезная на выходе двигателя;

$P_a$  – мощность электрических потерь в цепи якоря;

$P_{ст}$  – мощность потерь в магнитопроводе или в стали машины;

$P_{мех}$  – мощность механических потерь;

$P_f$  – мощность потерь в цепи обмотки возбуждения.

Коэффициент полезного действия двигателя определяется формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_f - P_{ст} - P_a - P_{мех}}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_{ст} + P_a + P_{мех}}.$$

Суммарная мощность потерь двигателей определяется экспериментально путем прямых измерений потребляемой мощности  $P_1$  и выходной мощности  $P_2$ . Для этого двигатель подключается к сети постоянного тока с номинальным напряжением. Затем он нагружается тормозным моментом при номинальной частоте вращения. Входная мощность двигателя определяется произведением тока двигателя на напряжение сети:  $P_1 = UI$ , а выходная мощность определяется произведением механического момента на валу на угловую частоту вращения, выраженную в радианах в секунду:  $P_2 = M\Omega$ .

В том случае, когда испытателя интересуют величины мощностей отдельных видов потерь, проводятся следующие измерения:

- Измерение сопротивления обмотки возбуждения при номинальном токе обмотки;
- Измерение сопротивления якорной цепи при номинальном токе якоря;
- Измерение механической мощности на валу отключенной от сети машины, якорь которой приводится во вращение другим посторонним двигателем;
- Измерение мощности потерь магнитопровода (при известных значениях других видов потерь) производится путем измерения мощности, потребляемой двигателем в режиме холостого хода  $P_{10}$ . Мощность потерь в стали в этом случае определится из формулы  $P_{ст} = P_{10} - P_f - P_a - P_{мех}$ .

Формула, определяющая зависимость КПД двигателя от тока якоря, для всех двигателей постоянного тока одинакова и не зависит от способа возбуждения, однако у двигателей последовательного возбуждения при изменении тока якоря механические потери и потери в стали машины практически не зависят от тока  $I_a$ . Потери же в обмотке возбуждения и в цепи якоря пропорциональны квадрату тока якоря.

КПД достигает максимального значения (рис. 8.12) при таких значениях тока, когда сумма потерь в стали и механических потерь равна сумме потерь в обмотке возбуждения и цепи якоря.

При номинальном токе КПД двигателя несколько меньше максимального значения.

**Кратность пускового тока** – отношение пускового тока двигателя к номинальному току.

### **Механический момент нагрузки.**

Под механическим моментом нагрузки понимают механический момент сопротивления двигателю со стороны исполнительного меха-

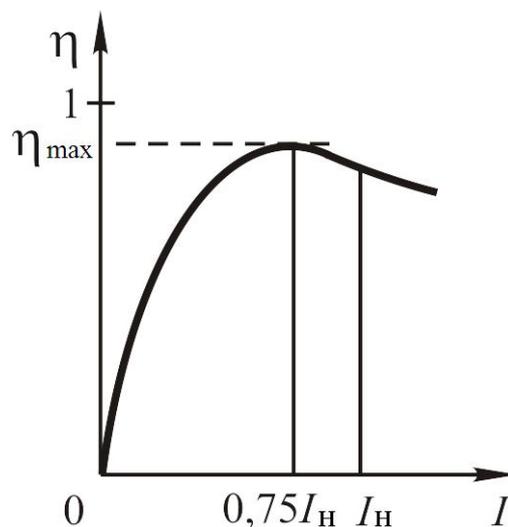


Рис. 8.12

низма, который воспринимает механическую энергию, вырабатываемую двигателем постоянного тока.

### **Механическая характеристика двигателя постоянного тока.**

Механической характеристикой называют зависимость частоты вращения якоря  $n$  от механического момента на валу двигателя  $M_2$  при постоянном напряжении питания и постоянном токе возбуждения, то есть  $n = f(M_2)$ . В дальнейшем будем предполагать, что электромагнитный момент равен механическому моменту на выходе двигателя  $M_{эм} = M_2 = M$ .

Особую роль играет механическая характеристика двигателя при номинальном напряжении питающей сети  $U = U_n = const$  и номинальном токе возбуждения  $I_f = I_{fn} = const$ . Такую механическую характеристику называют **естественной**. Рассматривают и другие механические характеристики, выражающие ту же зависимость  $n = f(M)$ , но при других условиях работы, то есть при других значениях напряжения, при других токах возбуждения и при различных сопротивлениях реостатов, включенных последовательно с якорем. Такие механические характеристики называют **искусственными**.

Получим аналитическое уравнение, описывающее механическую характеристику.

По уравнению электрического равновесия  $U = E + R_a I_a$ . Против-ЭДС обмотки якоря  $E = C_e n \Phi$ . Следовательно,  $U = E + R_a I_a = C_e n \Phi + R_a I_a$ . Из полученного уравнения  $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi}$ . Из уравнения для определения момента

$$M = C_m I_a \Phi \text{ следует, что } I_a = \frac{M}{C_m \Phi}. \text{ Тогда } n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a M}{C_e C_m \Phi^2}.$$

Обозначим  $a = \frac{U}{C_e \Phi}$  и  $b = \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$ . Тогда можно написать  $n = a - bM$ .

### **Механическая характеристика нагрузки двигателя.**

Механической характеристикой нагрузки называют зависимость механического момента сопротивления исполнительного механизма, на который работает двигатель, от скорости вращения приводного вала.

Различают статический момент нагрузки и динамический момент нагрузки. Статическим моментом нагрузки называют момент сопротивления исполнительного механизма при неизменной скорости вращения вала. Динамический момент сопротивления зависит от инерционных свойств нагрузки, поэтому определяется суммой произведения приведенного к валу момента инерции на угловое ускорение вала и статического момента сопротивления.

Статический момент нагрузки может изменяться при изменении скорости по линейному и нелинейному закону.

### **Мягкая механическая характеристика двигателя.**

Механическая характеристика называется мягкой, если значительное изменение механического момента нагрузки вызывает значительное изменение частоты вращения якоря. Двигатели с последовательным возбуждением имеют мягкую механическую характеристику.

Естественная механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения, то есть зависимость частоты вращения от механического момента на валу двигателя,  $n = f(M)$  рассматривается при постоянном напряжении питания, равном номинальному напряжению  $U = U_n = const$ . Если магнитная цепь машины не насыщена, то магнитный поток пропорционален току якоря, то есть  $\Phi = k_i I_a$ . При этом механический момент пропорционален квадрату тока

$M = C_m k_i I_a^2$ . Ток якоря в этом случае равен:  $I_a = \sqrt{\frac{M}{C_m k_i}}$ , а частота вращения

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R}{C_e k_i I_a} = \frac{U}{C_e k_i I} - \frac{R}{C_e k_i}.$$

Подставив вместо тока его выражение через механический момент, получаем:

$$n = \frac{U}{C_e k_i \sqrt{\frac{M}{C_m k_i}}} - \frac{R}{C_e k_i}.$$

Обозначив  $\frac{C_e k_i}{\sqrt{C_M k_i}} = l$  и  $\frac{R}{C_e k_i} = m$ ,

получим:  $n = \frac{U}{l\sqrt{M}} - m$ .

Полученное уравнение представляет собой гиперболу, пересекающую ось моментов в точке  $M_n = \frac{U^2}{l^2 m^2}$ .

Пусковой момент таких двигателей в десятки раз больше номинального момента.

Общий вид механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения представлен на рис. 8.13.

В режиме холостого хода частота вращения стремится к бесконечности. Это следует из аналитического выражения механической характеристики при  $M \rightarrow 0$ .

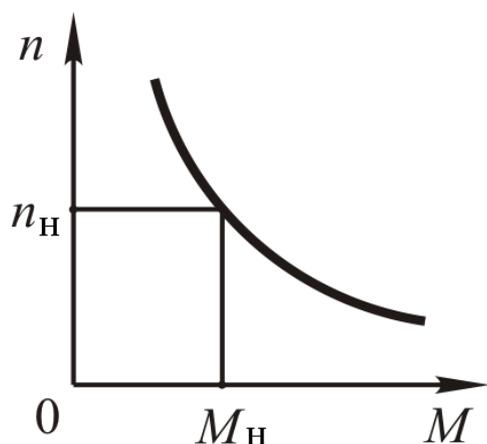


Рис. 8.13

У реальных двигателей последовательного возбуждения частота вращения якоря в режиме холостого хода может в несколько раз превышать номинальную частоту вращения. Такое превышение опасно и может привести к разрушению машины. По этой причине двигатели последовательного возбуждения эксплуатируются в условиях постоянной механической нагрузки, не допускающей режима холостого хода.

### Полюсное управление двигателем.

Под полюсным управлением двигателем постоянного тока понимают регулирование частоты вращения якоря путем изменения напряжения на зажимах обмотки возбуждения, тока возбуждения или путем изменения результирующей намагничивающей силы главных полюсов машины.

При полюсном управлении двигателем при постоянном моменте на валу ток якоря и напряжение на якоре остаются неизменными. Ре-

гулируют лишь ток возбуждения, изменение которого приводит к изменению магнитного потока. Тогда из уравнения скорости  $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$  очевидно то, что числитель дроби остается величиной постоянной и частота вращения обратно пропорциональна магнитному потоку.

Рассмотрим семейство механических характеристик двигателя, соответствующих различным значениям тока возбуждения, предполагая, что магнитная цепь машины не насыщена и магнитный поток прямо пропорционален току возбуждения. Построение механических характеристик будем вести, определяя частоту вращения идеального холостого хода  $n_0$  и величину пускового момента  $M_{\Pi}$ . На рис. 8.14 изображено семейство полных механических характеристик, соответствующих различным значениям тока возбуждения.

Естественная механическая характеристика представляет собой прямую линию, проходящую через точки

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \text{ и } M_{\Pi} = C_m \frac{U}{R_a}.$$

Из уравнения механической характеристики следует, что частота вращения идеального холостого хода обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ . Если предположить, что магнитный поток машины пропорционален току возбуждения, то  $\Phi = k_i I_f$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности. Тогда  $n_0 = \frac{U}{C_e k_i I_f}$ .

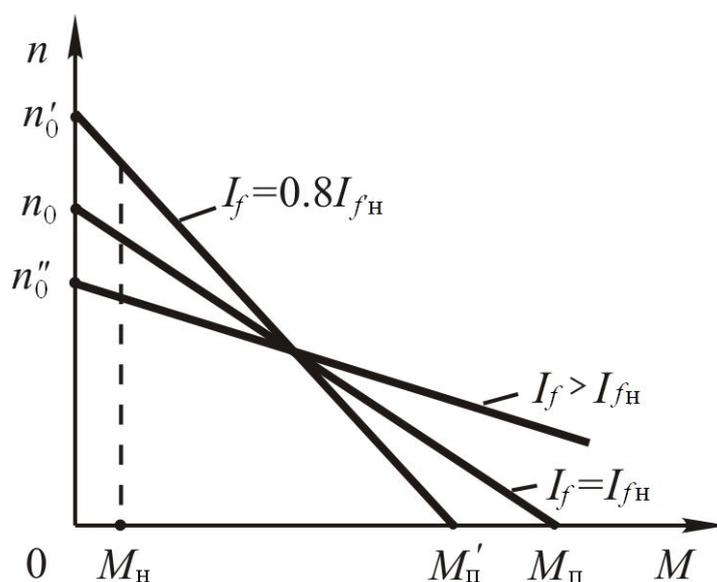


Рис. 8.14

При уменьшении тока возбуждения на 20% частота вращения идеального холостого хода  $n'_0$  увеличивается. Пусковой момент  $n'_0$

при этом уменьшается на 20% (рис. 8.14). При увеличении тока возбуждения на 20% происходит уменьшение частоты вращения идеального холостого хода  $n'_0$ . Пусковой момент при этом увеличится.

Механические характеристики двигателя при изменении механического момента в пределах, не превышающих рабочего диапазона, представлены на рис. 8.15.

При изменении тока возбуждения угол наклона механических характеристик изменяется. При этом уменьшение тока возбуждения приводит к увеличению частоты вращения, а увеличение тока возбуждения – к уменьшению частоты вращения двигателя. Диаметр провода обмотки возбуждения выбирается из условия прохождения номинального тока, поэтому значительное увеличение тока возбуждения приводит к перегреву обмотки возбуждения. Поэтому допускают превышение тока возбуждения на 15÷20%.

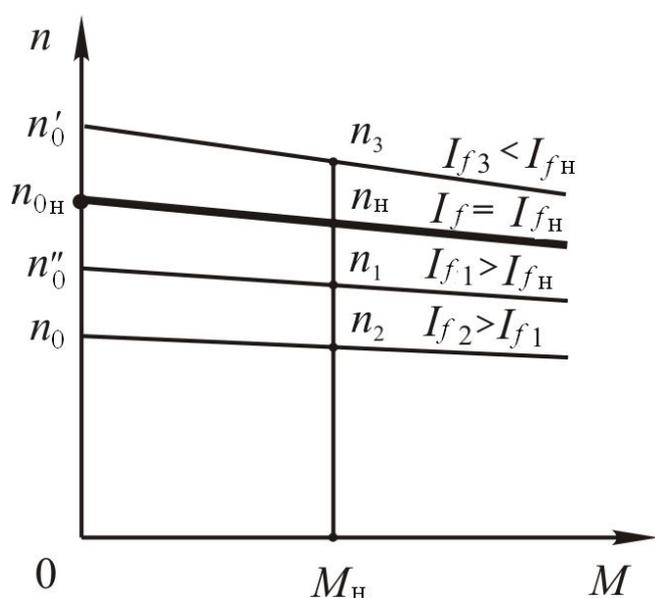


Рис. 8.15

Теоретически уменьшение тока возбуждения в два раза дает двукратное увеличение частоты вращения, что уже недопустимо.

Дальнейшее уменьшение тока возбуждения приводит к аварийной ситуации и к выходу двигателя из строя. Поэтому системы защиты двигателя контролируют силу тока возбуждения и отключают напряжение питания якоря при опасно малых токах

возбуждения. Таким образом, возможности полюсного управления двигателем постоянного тока весьма ограничены.

### Переменные потери в двигателе постоянного тока.

Одним из основных видов потерь в двигателе постоянного тока являются потери в цепи якоря, пропорциональные квадрату тока якоря. Эти потери определяются потерями в сопротивлении проводников обмотки якоря, сопротивлении перехода «щетке – коллектор» и со-

противлении самих щеток. Обычно измеряют электрическое сопротивление цепи якоря, по величине которого и судят о потерях. Этот вид потерь зависит от нагрузки, поэтому их относят к переменным потерям. К переменным потерям относят и дополнительные потери, зависящие от скорости вращения вала.

### **Постоянные потери в двигателе постоянного тока.**

Сумму механических потерь, потерь в обмотке возбуждения и потерь в магнитопроводе двигателя на вихревые токи и на перемагничивание называют постоянными потерями, так как они практически не зависят от нагрузки.

### **Потери механические в двигателе постоянного тока.**

Механическая часть конструкции машины вносит свой вклад в общий объем потерь энергии. В основном говорят о потерях в подшипниках, потерях, связанных с трением щеток о коллектор, и потерях в вентиляторе. Все эти потери связаны с преобразованием механической энергии в тепловую энергию. Мощность потерь, равную сумме мощностей потерь в подшипниках, вентиляторе и потерь, связанных с трением щеток о коллектор, называют механическими потерями  $P_{\text{мех}}$ .

**Потери энергии на вихревые токи** – потери электрической энергии внешних источников питания, связанные с возникновением токов в магнитопроводе, вызванных изменением величины и направления индукции магнитного поля и перемещением свободных зарядов по замкнутым путям в теле магнитопровода.

**Потери энергии на перемагничивание стали** – потери энергии внешнего источника электрической энергии, связанные с перемагничиванием магнитопровода. За счет энергии потерь на перемагничивание магнитопровод машины нагревается.

Барaban якоря двигателя постоянного тока изготавливают из листовой электротехнической стали. При работе двигателя якорь вращается в неподвижном магнитном поле, и это приводит к тому, что сталь якоря постоянно перемагничивается с частотой, кратной частоте вращения якоря. Кривая намагничивания стали неоднозначна. Ее еще называют **петлей гистерезиса**. Потери энергии однократного пе-

ремагничивания сердечника пропорциональны площади петли гистерезиса. Потери энергии на перемагничивание относят к потерям в стали. Индукция магнитного поля в статоре и главных полюсах не изменяется во времени, поэтому потери на перемагничивание в магнитопроводах этих частей машины практически отсутствуют.

### **Противо-ЭДС якоря двигателя постоянного тока.**

Электродвижущая сила, наведенная в обмотке якоря двигателя и направленная навстречу ЭДС внешнего источника питания.

**Прямой пуск двигателя постоянного тока** – прямое подключение двигателя к сети.

Пуск двигателей прямым включением возможен в том случае, когда питающая сеть обеспечивает кратковременный пропуск токов, которые больше номинального тока в десятки раз. Как правило, с помощью прямого включения осуществляется пуск двигателей только малой мощности.

При прямом пуске двигателя, то есть при подключении двигателя к сети при  $R_{\text{п}} = 0$ , ток якоря и частота вращения якоря изменяются в функции времени по сложному закону.

Частота вращения изменяется в функции времени по закону, близкому к экспоненциальному закону. Ток якоря за очень короткий промежуток времени, измеряемый миллисекундами, достигает значения, близкого к величине  $I_{\text{п}} = U/R$ , где  $R = R_{\text{п}} + R_{\text{а}}$ . С возрастанием частоты вращения и величины противо-ЭДС ток якоря уменьшается до установившегося значения, определяемого током холостого хода, если двигатель не нагружен, или до значения, достаточного для обеспечения преодоления механического момента сопротивления нагрузки. Длительность перехода из неподвижного состояния до установившейся скорости вращения в этом случае определяется соотношением пускового момента и момента сопротивления нагрузки.

### **Пуск двигателей.**

Совокупность мероприятий, обеспечивающих переход двигателя постоянного тока из нерабочего состояния в рабочее состояние и сам переход двигателя из нерабочего состояния в устойчивое рабочее со-

стояние, называют пуском двигателя. Основной задачей, возникающей при пуске двигателей, является получение оптимальной величины пускового механического момента и минимального пускового тока двигателя. Наилучший результат дают автоматические системы пуска двигателей постоянного тока, обеспечивающие плавный и быстрый пуск. Все автоматические системы создаются на основании определенного закона изменения тока якоря во времени при пуске двигателя.

**Пусковой механический момент двигателя постоянного тока** – механический момент, развиваемый двигателем, подключенным к источникам питания при неподвижном роторе (см. **Жесткая механическая характеристика двигателя**).

**Пусковой реостат** – реостат, используемый для ограничения пускового тока двигателя постоянного тока и обеспечивающий переход двигателя из нерабочего состояния в устойчивое рабочее состояние.

Сопротивление пускового реостата рассчитывается таким образом, чтобы величина пускового механического момента превышала номинальное значение в полтора-два раза. При увеличении частоты вращения якоря сопротивление пускового реостата уменьшают плавно или дискретно, вручную или автоматически. Специальные пусковые реостаты предусматривают устройства подключения и контроля тока возбуждения, чтобы исключить питание якоря двигателя при обрыве цепи обмотки возбуждения.

Рассмотрим процесс пуска двигателя постоянного тока с помощью пускового реостата. Схема подключения двигателя с пусковым реостатом изображена на рис. 8.16.

Пусковой реостат в рассматриваемом случае секционирован. Сопротивление каждой секции реостата вычисляется и зависит от режима пуска. Полное его сопротивление равно сумме сопротивлений секций:  $R_{\Pi} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ .

При переводе подвижного контакта в положение «1» цепь обмотки возбуждения получает питание непосредственно от источника и с этого момента остается подключенной к сети при всех последующих

положениях подвижного контакта. При таком положении подвижного контакта последовательно с якорем включено полное сопротивление реостата  $R_{\Pi}$ . Пусковой ток будет равен  $I_{\Pi} = \frac{U}{R_a + R_{\Pi}}$ .

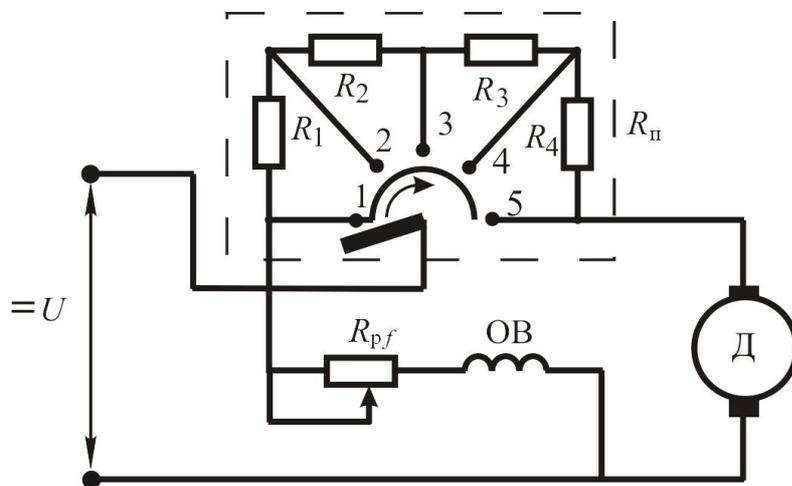


Рис. 8.16

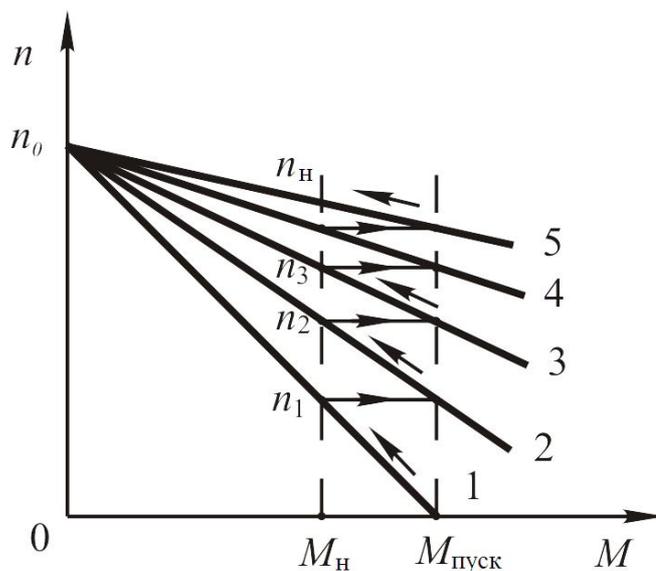


Рис. 8.17

Механический момент, развиваемый двигателем, будет равен  $M_{\Pi} = C_M I_{\Pi} \Phi$ .

Сопротивление пускового реостата выбирается такой величины, чтобы пусковой момент был в полтора – два раза больше номинального момента, то есть  $M_{\Pi} \approx 1,5 \div 2M_{\text{н}}$ . Пусть в нашем случае  $M_{\Pi} = 1,5M_{\text{н}}$ . Тогда механическая характеристика двигателя с включенным пусковым реостатом пройдет через точку  $n = n_0$  и  $M_{\Pi} = 1,5M_{\text{н}}$  (рис. 8.17).

В соответствии с механической характеристикой, соответствующей полному сопротивлению реостата (прямая 1), двигатель разовьет скорость  $n_1$  при номинальном моменте сопротивления  $M_n$ . На рисунке значению  $n_1$  соответствует максимальная частота вращения при полностью введенном пусковом реостате. Противо-ЭДС якоря достигнет значения  $E = C_e n_1 \Phi$ , а ток якоря уменьшится до номинальной величины. При достижении частоты вращения  $n_1$  подвижной контакт пускового реостата переводится в положение «2» и его сопротивление уменьшается до значения

$$R'_n = R_2 + R_3 + R_4.$$

При таком сопротивлении ток якоря увеличивается снова до значения  $1,5I_n$ , а режим работы двигателя определяется искусственной механической характеристикой 2. В соответствии с этой характеристикой двигатель разгоняется до частоты вращения  $n_2$ . Подвижной контакт переводится в положение 3, после чего в двигателе происходят процессы, аналогичные процессам, описанным выше.

Далее контакт переводят в 4-е положение и, наконец, в 5-е. При таком положении подвижного контакта пусковой реостат полностью выведен из цепи якоря и двигатель начинает работать в соответствии со своей естественной механической характеристикой, обеспечивая номинальную частоту вращения  $n_n$ . Пуск двигателя закончен.

Расчет пускового реостата заключается в вычислении его полного сопротивления и сопротивлений его секций ( $R_n, R_1, R_2, R_3$ , и  $R_4$ ). Полное сопротивление реостата вычисляется по формуле:

$$R_n = \frac{U}{k_n I_n} - R_a,$$

где  $U$  – напряжение питания;

$I_n$  – номинальный ток;

$R_a$  – сопротивление якоря;

$k_n$  – коэффициент перегрузки при пуске двигателя ( $k \approx 1,2 \div 3$ ).

Сопротивления секций  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4$  вычисляются исходя из следующих соображений.

При полностью введенном сопротивлении реостата установившийся режим имеет место тогда, когда момент двигателя равен номинальному  $M_H$ . Ток якоря в этом случае также равен номинальному  $I_H$ . Следовательно,  $U = E + I_H(R_{\Pi} + R_a)$ .

Отсюда ЭДС  $E = U - I_H(R_{\Pi} + R_a)$ .

При изменении положения подвижного контакта сопротивление реостата будет равно  $(R_2 + R_3 + R_4)$ . Частота вращения останется неизменной. Прежней останется и ЭДС двигателя. Следовательно,

$$U = E + kI(R_2 + R_3 + R_4 + R_a).$$

Коэффициент  $k$  в приведенной формуле равен отношению максимального тока якоря, допустимого при пуске, к номинальному току.

Из приведенной формулы получаем формулу для определения величины сопротивления реостата на втором этапе пуска двигателя.

$$\begin{aligned} R_{\Pi 1} = R_2 + R_3 + R_4 + R_a &= \frac{U - E}{kI_H} = \\ &= \frac{U - U + I_H(R_{\Pi} + R_a)}{kI_H} = \frac{I_H(R_{\Pi} + R_a)}{kI_H} = \frac{(R_{\Pi} + R_a)}{k}. \end{aligned}$$

При измененном сопротивлении установившийся режим будет иметь место для частоты вращения  $i = i_2$ . Аналогично определяем

$$R_{\Pi 2} = R_3 + R_4 + R_a = \frac{R_2 + R_3 + R_4 + R_a}{k};$$

$$R_{\Pi 3} = R_4 + R_a = \frac{R_3 + R_4 + R_a}{k}.$$

Более детальное секционирование пускового реостата нецелесообразно. Обычно используют пусковые реостаты, состоящие из 4-7 секций. Сопротивления отдельных секций, то есть значения  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , легко вычисляются из полученных значений в соответствии со схемой (рис. 8.2).

$$R_1 = R_{\Pi} - R_{\Pi 1}, R_2 = R_{\Pi 1} - R_{\Pi 2}, R_3 = R_{\Pi 2} - R_{\Pi 3}, R_4 = R_{\Pi 3} - R_a.$$

При использовании несекционированного пускового реостата сопротивление уменьшается с таким расчетом, чтобы ток якоря был

максимально близким к значению  $I_a = kI_H$ , что обеспечивает минимальное время пуска двигателя.

Графики изменения тока якоря и частоты вращения двигателя при пуске двигателя с помощью секционированного пускового реостата представлены на рис. 8.18.

Следует помнить о том, что пусковой реостат работает коротковременно, поэтому его номинальная мощность может быть меньше, чем максимальная мощность, вычисленная из соотношения для рассматриваемого случая.

$$P_{\text{макс}} = k^2 I_H^2 R_{\text{п}}.$$

Пуск двигателей с последовательным и смешанным возбуждением осуществляется аналогично пуску двигателей с независимым возбуждением.

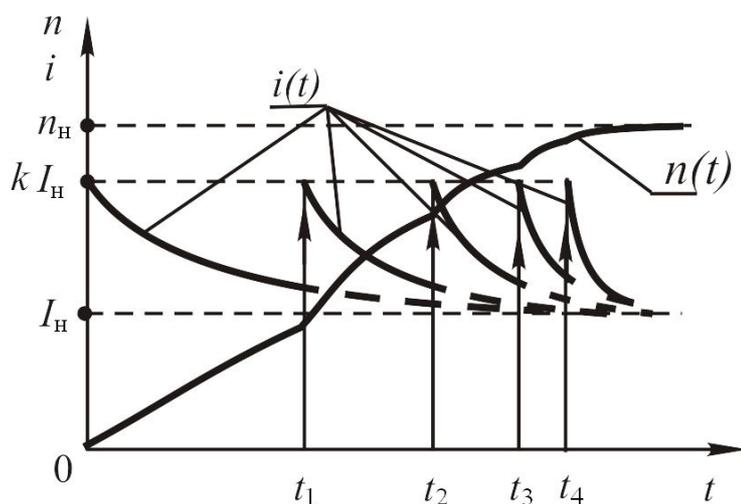


Рис. 8.18

**Пусковой ток двигателя** – сила тока двигателя, подключенного к источникам электрической энергии при неподвижном якоре. Сила пускового тока определяется из уравнения  $I_{\text{п}} = \frac{U}{R_a}$ . При подключении двигателя в сеть в начальный момент времени из-за инерционности якоря частота вращения равна нулю  $n = 0$ . Противо-ЭДС обмотки якоря тоже равна нулю, и тогда приложенное напряжение падает только на сопротивлении якорной цепи. Ток якоря в этом случае достигает больших величин из-за малости  $R_a$ .

### **Рабочая точка механической характеристики двигателя.**

Рабочей точкой механической характеристики двигателя называют значение механического момента на валу двигателя и соответствующей этому моменту частоты вращения вала, при которых имеется равенство механического момента, развиваемого двигателем, и статического механического момента нагрузки.

Рабочая точка механической характеристики двигателя может быть получена графически. Рабочая точка является точкой пересечения механической характеристики двигателя и механической характеристики нагрузки.

Если имеются уравнения механических характеристик двигателя и нагрузки, рабочая точка является результатом совместного решения этих уравнений.

**Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока (управление двигателем).** Изменение частоты вращения вала двигателя постоянного тока с помощью изменения параметров элементов электрической цепи, обеспечивающей функционирование двигателя, или с помощью изменения параметров двигателя.

Основным преимуществом двигателей постоянного тока является сравнительная простота регулирования частоты вращения якоря в большом диапазоне.

Сущность каждого способа регулирования частоты вращения можно понять, анализируя уравнение, определяющее связь между частотой вращения, напряжением питания, сопротивлением регулировочного реостата и током возбуждения. При этом ток возбуждения определяет магнитный поток машины.

Уравнение электрического равновесия двигателя, последовательно с якорем которого включен регулировочный реостат с сопротивлением  $R_p$ :

$$U = E + (R_a + R_p)I_a \quad \text{или} \quad U = C_e n \Phi + (R_a + R_p)I_a .$$

$$\text{Отсюда} \quad n = \frac{U - (R_a + R_p)I_a}{C_e \Phi} .$$

Из формулы следует, что частота вращения пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ . Кроме того, частота вращения зависит от сопротивления реостата, включенного последовательно с якорем. В знаменатель уравнения входит постоянная величина, зависящая от конструкции машины. Постоянная величина зависит от конструкции обмотки якоря, количества витков обмотки и количества пар полюсов машины. Эффективное количество витков обмотки якоря может быть изменено. Поэтому можно рассматривать четыре способа регулирования частоты вращения якоря.

Основными способами регулирования частоты вращения якоря двигателей являются:

- **якорное управление;**
- **полюсное управление;**
- **реостатное управление;**
- регулирование путем изменения параметров двигателя.

Возможно использование комбинированных способов регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока.

**Режим работы двигателя** – совокупность условий и параметров элементов системы, при которых работает двигатель постоянного тока.

Режим холостого хода – это такой режим работы двигателя, когда механический момент нагрузки двигателя равен нулю.

Номинальный режим работы двигателя – это такой режим работы двигателя, когда напряжение питания равно номинальному напряжению, ток обмотки возбуждения равен номинальному току и механический момент исполнительного механизма равен номинальному моменту.

Существуют другие режимы работы двигателей постоянного тока, связанные с зависимостью от времени подачи напряжения питания на двигатель и связанные с изменением во времени механического момента нагрузки.

#### **Реостатный пуск двигателя постоянного тока.**

Пуск двигателя с помощью реостата, включенного последовательно с обмоткой якоря и предназначенного для ограничения величины пускового тока двигателя.

Реостатный пуск двигателей достаточно прост, но при пуске в пусковом реостате теряется большое количество энергии. При таком способе пуска двигателя возможно появление кругового огня на коллекторе из-за больших пусковых токов и система защиты двигателя должна быть более сложной. Сеть питания двигателя должна быть хорошо рассчитана.

На рис. 8.16 приведена схема включения двигателя параллельного возбуждения, используемая при реостатном пуске, на которой  $R_{pf}$  – реостат в цепи возбуждения,  $R_{п}$  – пусковой реостат, ОВ – обмотка возбуждения двигателя и Д – якорь двигателя.

Реостатный пуск необходим в тех случаях, когда сеть или источник питания двигателя не рассчитаны на прохождение пусковых токов, превышающих номинальный ток в 10÷15 раз. Как правило, речь идет о двигателях средней и большой мощности. Сопротивление пускового реостата рассчитывается для каждого двигателя.

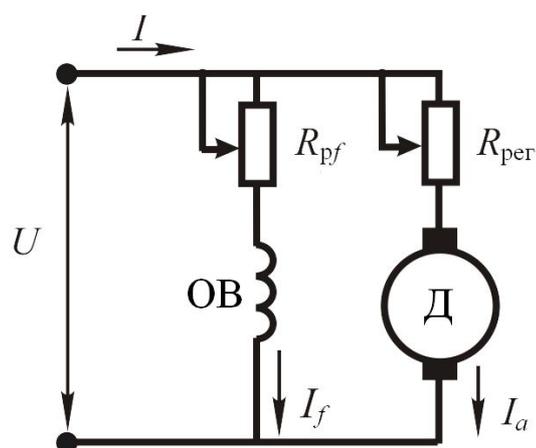


Рис. 8.19

### Реостатное управление двигателем

– изменение частоты вращения двигателя путем изменения сопротивления цепи якоря.

Для такого регулирования последовательно с якорем включают реостат  $R_{пер}$  (рис. 8.19). Изменение частоты вращения двигателя постоянного тока с помощью регулировочного реостата возможно в том случае, когда двига-

тель нагружен механическим моментом, близким к номинальной величине. Принцип регулирования основан на том, что при изменении сопротивления цепи якоря изменяется угол наклона механической характеристики двигателя к оси моментов и при постоянном механическом моменте сопротивления на валу частота вращения изменяется.

Рассмотрим полные механические характеристики при различных сопротивлениях регулировочного реостата. Семейство механических характеристик двигателя при различных величинах сопротивлений регулировочного реостата  $R_{пер}$  показано на рис. 8.20. Формула,

описывающая механическую характеристику двигателя при включенном последовательно с якорем регулировочном реостате

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + R_{\text{рег}})I_a}{C_e \Phi}.$$

Положение механической характеристики определяется двумя точками: скоростью идеального холостого хода  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$  и пусковым моментом  $M_{\text{п}} = C_m \frac{U}{R_a + R_{\text{рег}}} \Phi$ .

Из приведенных формул следует, что скорость идеального холостого хода не зависит от сопротивления регулировочного реостата. Величина пускового момента обратно пропорциональна этому сопротивлению. Поэтому угол наклона характеристик при увеличении сопротивления регулировочного реостата увеличивается и  $M_{\text{п}2} < M_{\text{п}1} < M_{\text{п}0}$ . Механические характеристики двигателя для значений моментов от 0 до  $1,5 M_{\text{н}}$  при различных величинах сопротивлений регулировочного реостата  $R_{\text{рег}}$  показаны на рис. 8.21.

При неизменном механическом моменте ток якоря является величиной постоянной и вторая слагаемая уравнения частоты вращения  $n = n_0 - \frac{(R_a + R_{\text{рег}})I_a}{C_e \Phi}$ , имея отрицательный знак, увеличивается при увеличении  $R_{\text{рег}}$ . Таким образом, увеличение  $R_{\text{рег}}$  приводит к уменьшению частоты вращения двигателя.

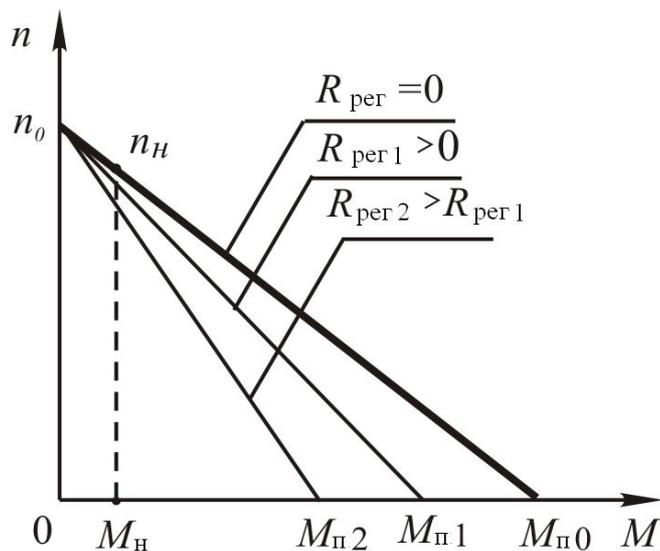


Рис. 8.20

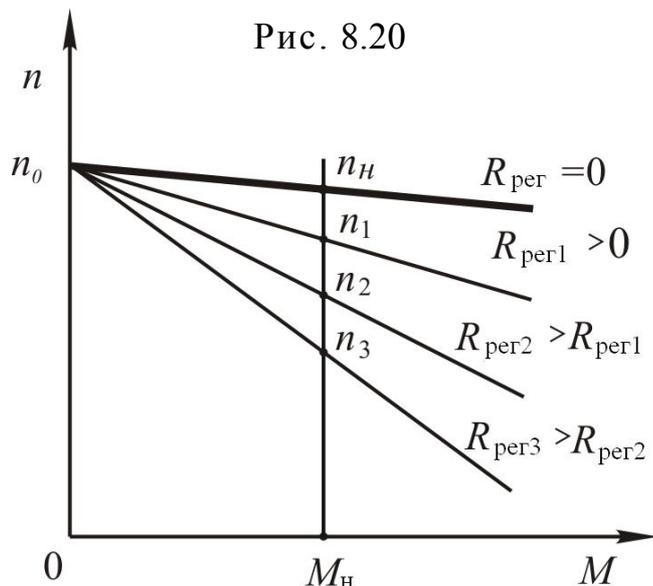


Рис. 8.21

При неизменном механическом моменте ток якоря является величиной постоянной и вторая слагаемая уравнения частоты вращения

$$n = n_0 - \frac{(R_a + R_{\text{рег}})I_a}{C_e \Phi},$$

имея отрицательный знак, увеличивается при увеличении  $R_{\text{рег}}$ . Таким образом, увеличение  $R_{\text{рег}}$  приводит к уменьшению частоты вращения двигателя.

При таком способе регулирования частоты вращения при постоянном моменте на валу мощность, потребляемая из сети, остается неизменной:  $P_1 = UI$ . Выходная же мощность двигателя при уменьшении частоты вращения уменьшается, так как  $P_2 = \frac{\pi n}{30} M_2$ . Мощность потерь  $P = P_1 - P_2$ , равная разности мощности, потребляемой из сети, и выходной мощности, с уменьшением частоты вращения увеличивается за счет увеличения мощности нагревания регулировочного реостата, так как потери в самом двигателе изменяются незначительно. КПД всей установки при таком способе регулирования частоты вращения гораздо меньше номинального значения. Поэтому с точки зрения энергетических затрат такой способ регулирования частоты вращения неэффективен.

**Семейство характеристик двигателя** – совокупность зависимостей одного параметра от другого параметра при различных значениях третьего параметра двигателя. В качестве примера можно рассматривать механические характеристики двигателя постоянного тока при различных сопротивлениях реостата, включенного последовательно с якорем.

**Сила, действующая на проводник с током**, – механическая сила, действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

Теория электромагнитного поля указывает на силовое взаимодействие проводника с током и магнитным полем.

Если проводник с током находится в магнитном поле, то на него действует механическая сила, перпендикулярная силовым линиям и проводнику (рис. 8.22). Величина этой силы пропорциональна интенсивности магнитного поля  $B$ , длине проводника  $l$  и току  $i$ , протекающему по проводнику.

Следовательно, на проводник  $ab$  с током  $i$  длиной  $l$ , помещенный в равномерное магнитное поле с индукцией  $B$ , действует механическая сила  $F$ , величина которой определяется уравнением  $F = B \cdot l \cdot i$  в том случае, если вектор индукции и проводник перпендикулярны друг другу.

Вектор силы перпендикулярен проводнику и вектору индукции. Направление механической силы, действующей на проводник, принято определять по **правилу левой руки**.

**Скорость (частота) вращения якоря** – угловое перемещение якоря в единицу времени. Частота вращения определяется отношением приращения углового перемещения к приращению времени. Она измеряется в оборотах в минуту (об/мин) или в радианах в минуту (рад/мин).

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока зависит от условий работы и конструктивных параметров двигателя.

Уравнение электрического равновесия якоря записывается в следующем виде:  $U = E + R_a I_a$ . Против-ЭДС обмотки якоря  $E = C_e n \Phi$ . Следовательно,  $U = E + R_a I_a = C_e n \Phi + R_a I_a$ . Из полученного уравнения

$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi}$ . Ток можно определить из уравнения для определе-

ния момента:  $I_a = \frac{M}{C_m \Phi}$ . Тогда  $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a M}{C_e C_m \Phi^2}$ .

Уравнение состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое не зависит от момента, а второе слагаемое прямо пропорционально механическому моменту  $M$ . Таким образом, частота вращения двигателя постоянного тока зависит от напряжения на якоре, магнитного потока машины, конструкции машины и сопротивления якоря.

**Скоростная характеристика двигателя постоянного тока** – зависимость частоты вращения якоря от тока якоря двигателя  $n = f(I_a)$  при постоянном напряжении питания  $U = const$  и постоянном токе цепи возбуждения. Скоростная характеристика двигателя постоянного тока может быть описана аналитическим уравнением.

Для получения функциональной зависимости частоты вращения якоря двигателей с параллельным возбуждением от тока якоря воспользуемся уравнением электрического равновесия двигателя:

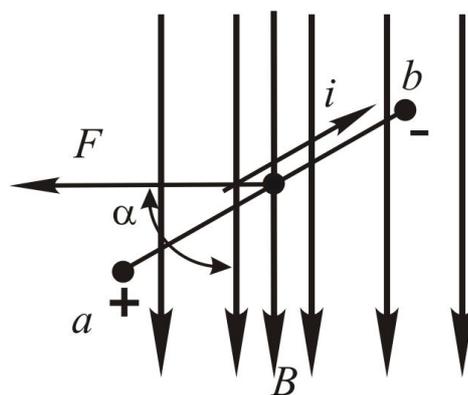


Рис. 8.22

$$U = E + R_a I_a = C_e n \Phi + R_a I_a.$$

Из этого уравнения получаем выражение для частоты вращения:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{C_e \Phi}.$$

В полученной формуле от тока якоря зависят две составляющие: произведение  $R_a I_a$  и результирующий магнитный поток машины  $\Phi$ .

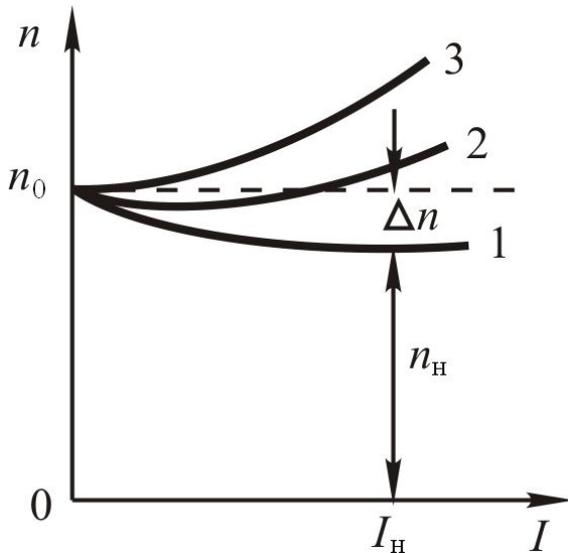


Рис. 8.23

Произведение  $R_a I_a$ , равное падению напряжения на сопротивлении цепи якоря, приводит к пропорциональному уменьшению частоты вращения при увеличении тока якоря. Магнитный поток машины при увеличении тока якоря из-за реакции якоря несколько уменьшается. Эта зависимость магнитного потока от тока якоря нелинейная, поэтому и скоростная характеристика двигателей с независимым и параллельным возбуждением нелинейная (рис. 8.23).

В зависимости от соотношения влияния на частоту вращения падения напряжения  $R_a I_a$  и изменения магнитного потока двигателя характеристика скорости может иметь разный вид. На рис. 8.23 кривая 1 представляет собой характеристику скорости двигателя, у которого влияние падения напряжения  $R_a I_a$  преобладает над влиянием изменения магнитного потока  $\Phi$  под действием реакции якоря; кривая 2 представляет собой скоростную характеристику двигателя, у которого влияние изменения магнитного потока  $\Phi$  преобладает над влиянием падения напряжения на сопротивлении цепи якоря  $R_a I_a$ .

Чаще всего встречаются двигатели, у которых уменьшение частоты вращения за счет падения напряжения на сопротивлении цепи якоря преобладает над влиянием реакции якоря, приводящей к уменьшению магнитного потока.

Естественная скоростная характеристика двигателей последовательного возбуждения выражается зависимостью  $n = f(I)$  при  $U = U_H = const$ . При отсутствии дополнительного реостата в цепи якоря двигателя сопротивление цепи определяется суммой сопротивления якоря и обмотки возбуждения  $R = R_f + R_a$ , которые достаточно малы. Скоростная характеристика описывается таким же уравнением, каким описывается скоростная характеристика двигателя с независимым возбуждением:

$$n = \frac{U - IR}{C_e \Phi}.$$

Отличие заключается в том, что магнитный поток машины  $\Phi$  создается током якоря  $I_a$  в соответствии с кривой намагничивания магнитной цепи машины. Для упрощения анализа предположим, что магнитный поток машины пропорционален току обмотки возбуждения, то есть току якоря  $I$ . Тогда  $\Phi = k_i I$ , где  $k_i$  – коэффициент пропорциональности.

Заменяя магнитный поток в уравнении скоростной характеристики, получим уравнение  $n = \frac{U}{C_e k_i I} - \frac{R}{C_e k_i}$ .

График скоростной характеристики двигателя с последовательным возбуждением представлен на рис. 8.24.

Из полученной характеристики следует, что в режиме холостого хода, то есть при токах якоря, близких к нулю, частота вращения якоря в несколько раз превышает номинальное значение, а при стремлении тока якоря к нулю частота вращения стремится к бесконечности (ток якоря в первом слагаемом полученного выражения входит в знаменатель). Если считать формулу справедливой для весьма больших токов якоря, то можно сделать предположение, что  $I_H = U/R$ . Полученное уравнение позволяет получить значение силы тока  $I_a$ , при котором частота вращения якоря будет равняться нулю. У реальных двигателей последовательного возбуждения при определенных значениях тока магнитопровод машины входит в насыщение, и магнитный поток машины изменяется незначительно при значительных изменениях тока.

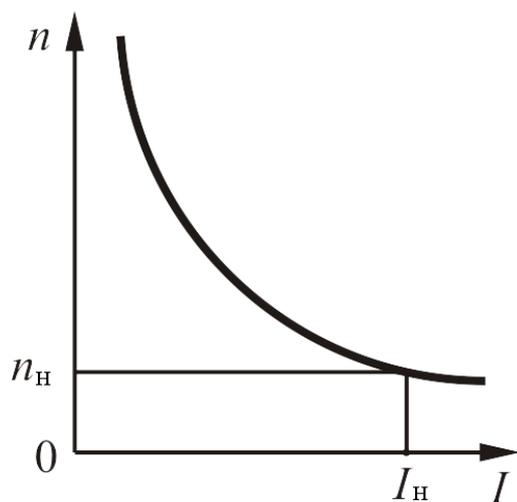


Рис. 8.24

Характеристика показывает, что изменение тока якоря двигателя в области малых значений приводит к значительным изменениям частоты вращения.

**Скорость идеального холостого хода двигателя постоянного тока** – частота вращения якоря, при которой ток якоря равен нулю. Определить скорость идеального холостого хода экспериментально без помощи внешнего приводного механизма невозможно,

так как в реальном режиме холостого хода ток якоря не равен нулю. Двигатель в этом случае потребляет из сети энергию, необходимую для компенсации всех видов потерь в двигателе.

В режиме идеального холостого хода электромагнитный момент двигателя с независимым возбуждением равен нулю  $M_{эм} = 0$  и при номинальном напряжении якорь вращается с частотой  $n_0 = \frac{U_H}{C_e \Phi}$ .

Скорость идеального холостого хода двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением равна бесконечности.

### Способы уменьшения потерь на вихревые токи.

Уменьшения потерь на вихревые токи достигают путем увеличения удельного сопротивления магнитного материала и уменьшением магнитного потока элементарного сердечника. Последнее реализуется посредством изготовления сердечников из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали.

**Уравнение электрического равновесия двигателя** – уравнение, выражающее связь между приложенным напряжением, противо-ЭДС, током якоря и сопротивлением якорной цепи машины. Уравнение электрического равновесия двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением при отсутствии дополнительного реостата в цепи якоря  $U = E + R_a I_a$ .

### Характеристика момента двигателя постоянного тока.

Характеристикой момента двигателя с параллельным или независимым возбуждением называют зависимость механического момента на валу двигателя от тока якоря  $M_2 = f(I)$  при постоянном номинальном напряжении питания  $U = U_H = const$  и при постоянном номинальном токе возбуждения  $I_f = I_{fH} = const$ .

Ток якоря ненагруженного двигателя не равен нулю. Это объясняется наличием потерь в двигателе, работающем без нагрузки. Такой ток называется током холостого хода  $I_{a0}$  двигателя.

Используя ранее полученную формулу для определения механического момента на валу двигателя, получаем для двигателя, работающего в режиме холостого хода,  $M_0 = C_M I_{a0} \Phi$ .

Нагруженный двигатель при токе якоря  $I_a$  развивает электромагнитный момент  $M_{эм} = C_M I_a \Phi$ .

Механический момент на выходе двигателя равен разности электромагнитного момента и момента холостого хода  $M_2 = M_{эм} - M_0$ .

При неизменной величине магнитного потока  $\Phi$  зависимости  $M_2 = f(I_a)$  и  $M_{эм} = f(I_a)$  являются прямыми линиями.

Однако магнитный поток машины несколько уменьшается при увеличении тока якоря  $I_a$  из-за реакции якоря, поэтому характеристики  $M_{эм} = f(I_a)$  и  $M_2 = f(I_a)$  не являются прямолинейными (рис. 8.25). Максимальное значение тока якоря ( $I_0$ ), при котором якорь ненагруженного двигателя ( $M_2 = 0$ ) начинает вращаться, называют током трогания. Электромагнитный момент в этом случае равен моменту холостого хода.

Рассмотрим характеристику момента двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением  $M = f(I)$  при  $U = U_H = const$ .

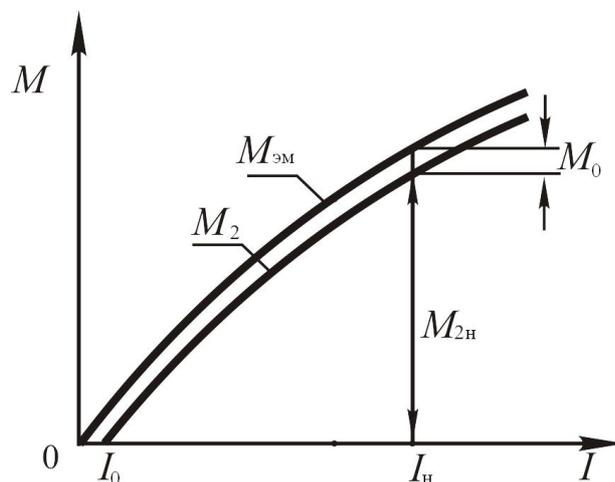


Рис. 8.25

Если магнитная цепь машины не насыщена, магнитный поток пропорционален току якоря  $\Phi = k_i I$ , а электромагнитный момент  $M$  будет пропорционален квадрату тока якоря:  $M = C_m k_i I^2$  (рис. 8.26).

Полученная формула с математической точки зрения представляет собой параболу (кривая 1 на рис. 8.26). Реальная характеристика проходит ниже теоретической (кривая 2 на рис. 8.26), так как из-за насыщения магнитной цепи машины магнитный поток не пропорционален току обмотки возбуждения или в рассматриваемом случае – току якоря.

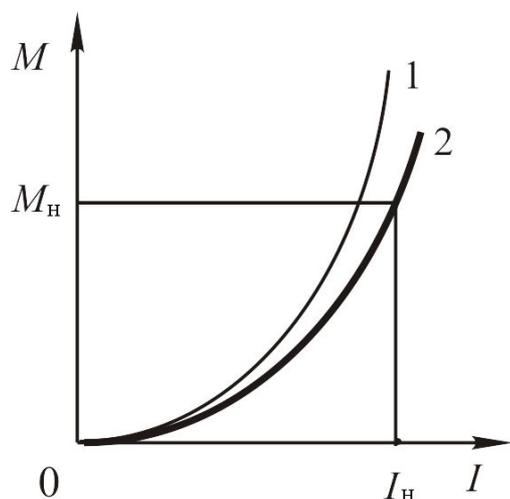


Рис. 8.26

**Холостой ход двигателя** – работа двигателя постоянного тока при моменте сопротивления исполнительного механизма, равном нулю. При работе двигателя постоянного тока в режиме холостого хода он потребляет из питающей сети энергию, необходимую для компенсации потерь в стали, потерь в меди и механических потерь двигателя. В теории электрических машин рассматривают идеальный холостой ход двигателя. Это такой режим

работы двигателя, когда ток якоря двигателя равен нулю. Такой режим работы двигателя возможен только при наличии внешнего приводного механизма, который обеспечивает вращение якоря с частотой, при которой ток якоря будет равен нулю. В этом случае противо-ЭДС якоря будет равна напряжению источника питания якоря.

**Электродвижущая сила якорной обмотки** – электродвижущая сила, наведенная в обмотке вращающегося якоря, величина и полярность которой зависит от величины магнитного потока, от частоты вращения якоря и от конструктивных особенностей машины.

Магнитную цепь электрической машины проектируют с таким расчетом, чтобы векторы магнитной индукции в воздушном зазоре машины были практически перпендикулярны поверхности якоря. Распределение же индукции по воздушному зазору, как указывалось

ранее, неравномерно. Электродвижущую силу обмотки якоря можно вычислить по формуле  $E = C_e \cdot n \cdot \Phi$ , где  $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$  – конструктивная постоянная машины при определении ее ЭДС;  $n$  – частота вращения якоря;  $\Phi$  – магнитный поток машины, который зависит в общем случае от намагничивающей силы обмотки возбуждения и, следовательно, от тока обмотки возбуждения  $I_f$ .

Полученная формула дает хороший результат, то есть может быть использована для построения и объяснения поведения характеристик машин постоянного тока. Реальное значение электродвижущих сил якорных обмоток несколько ниже расчетных. Это объясняется следующим явлением. ЭДС отдельного проводника пропорциональна индукции магнитного поля в зоне его расположения в каждый момент времени:  $e = B \cdot l \cdot v$ .

При вращении якоря с частотой  $n$  эта ЭДС изменяется по периодическому закону, повторяющему по форме закон распределения индукции в зазоре.

Как известно из курса электротехники, такая периодическая несинусоидальная функция может быть представлена в виде ряда Фурье для любого  $k$ -го витка.

Секции обмотки якоря расположены в различных пазах, то есть смещены в пространстве на определенный пространственный угол. Это приводит к тому, что гармонические составляющие ЭДС каждой секции будут сдвинуты по фазе. В этом случае суммарная ЭДС ветви обмотки якоря, представляющая собой сумму мгновенных значений ЭДС отдельных витков, будет равна не сумме амплитуд соответствующих гармоник, а их векторной сумме с учетом разности фаз. Для более наглядного объяснения обычно используют векторно-топографическую диаграмму первых гармоник ЭДС якорной обмотки (рис. 8.27).

Здесь  $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3, \underline{E}_4, \underline{E}_5, \underline{E}_6$  – векторы ЭДС секций одной из параллельных

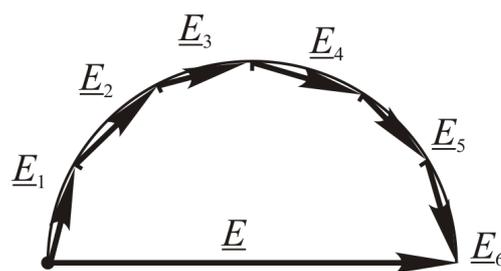


Рис. 8.27

ветвей двухполюсной машины, имеющей на поверхности якоря 12 пазов для укладки обмоток. В такой машине секции якорной обмотки сдвинуты в пространстве на 30 пространственных градусов. Как следует из приведенного примера, результирующая ЭДС  $E$  всегда меньше суммы действующих значений ЭДС секций. Векторная сумма других гармонических составляющих ЭДС секций дает похожий результат.

Таким образом, ЭДС якорной обмотки реальной машины всегда меньше расчетного значения. Это уменьшение учитывается путем введения дополнительного коэффициента в постоянную  $C_e$ . Значение этого коэффициента уточняется экспериментально.

**Электромагнитный момент двигателя** – результирующий механический момент, развиваемый двигателем в результате силового взаимодействия магнитного поля машины постоянного тока и токов проводников обмотки якоря. Электромагнитный момент двигателя всегда больше механического момента на валу из-за наличия трения в подшипниках и других механических потерь.

Величина электромагнитного момента складывается из механических моментов, действующих на проводники якорной обмотки. Сила, действующая на проводник с током  $I'$  длиной  $l$ , находящийся в магнитном поле с индукцией  $B$ , определяется из формулы:  $F = B \cdot I' \cdot l$ .

Механический момент, создаваемый одним проводником,  $M' = F \cdot R$ , где  $R$  – радиус якоря.

Если в пазах якоря уложено  $N$  проводников, то, используя среднее значение индукции  $B_{cp}$ , получим:

$$M'' = N \cdot M' = N \cdot B_{cp} \cdot I' \cdot l \cdot R .$$

Если общий ток якоря  $I$ , а обмотка имеет  $2a$  параллельных ветвей, то ток одного проводника обмотки в  $2a$  раз меньше общего тока, то есть  $I' = \frac{I}{2 \cdot a}$ , тогда  $M = \frac{N \cdot l \cdot R}{2 \cdot a} \cdot B_{cp} \cdot I$ .

Введя в формулу величину диаметра якоря  $R = D/2$  и умножив числитель и знаменатель на  $\pi$ , получим:  $M = \frac{N \cdot l \cdot D \cdot \pi}{4 \cdot a \cdot \pi} \cdot B_{cp} \cdot I$ .

Умножим и разделим полученное выражение на количество полюсов машины  $2 \cdot p$ , тогда

$$M = \frac{l \cdot 2 \cdot p}{4 \cdot a \cdot \pi} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \cdot B_{\text{ср}} \cdot I = \frac{p \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \cdot B_{\text{ср}} \cdot I.$$

Величина  $\pi \cdot D \cdot l$  является длиной окружности якоря, умноженной на длину внешней поверхности якоря, то есть площадью поверхности якоря. Эта площадь, разделенная на количество полюсов, определит площадь якоря, находящуюся над одним полюсом:

$$S_{\Pi} = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p}.$$

Произведение среднего значения индукции на эту площадь равно магнитному потоку машины, или

$$\frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \cdot B_{\text{ср}} = S_{\Pi} \cdot B_{\text{ср}} = \Phi.$$

Подставляя это значение в формулу момента, получаем:

$$M = \frac{p}{2 \pi \cdot a} \cdot N \cdot \Phi \cdot I.$$

Обозначив  $\frac{p \cdot N}{2 \pi \cdot a}$  постоянной  $C_M$ , то есть постоянной, зависящей лишь от конструкции машины, получим:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I.$$

Таким образом, электромагнитный механический момент на валу машины постоянного тока зависит от конструкции машины и пропорционален магнитному потоку и току якоря.

**Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока** – диаграмма, поясняющая пути преобразования электрической энергии, потребленной двигателем постоянного тока от источника питания, в другие виды энергии.

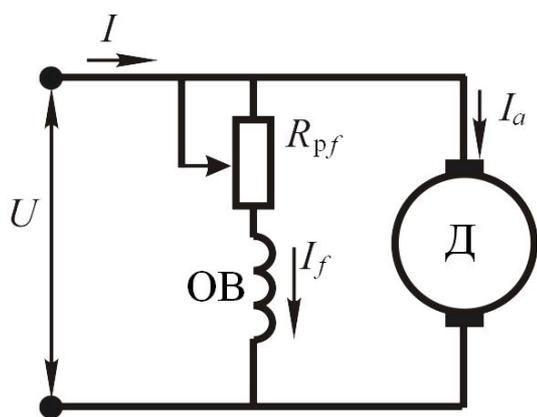


Рис. 8.28

На рис. 8.28 изображена электрическая схема двигателя с параллельным возбуждением, а на рис. 8.29 приведена энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока. Рассмотрим распределение энергии, потребленной из сети, в двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением.

Реостат  $R_{pf}$ , включенный последовательно с обмоткой возбуждения, необходим для регулирования силы тока возбуждения. При работе двигателя в номинальном режиме сопротивление цепи возбуждения определяется сопротивлением проводов обмотки возбуждения и сопротивлением этого реостата. В общем случае ток, протекающий в этой цепи, нагревает обмотку и провод регулировочного реостата. Таким образом, мы имеем дело с рассеиванием электрической энергии в этой цепи. Если сопротивление обмотки возбуждения обозначить  $R_{of}$ , а сопротивление регулировочного реостата  $R_{pf}$ , то полное сопротивление цепи возбуждения  $R_f$  определится из уравнения  $R_f = R_{pf} + R_{of}$ , а потери энергии в этой цепи можно вычислить по формуле вычисления мощности  $P_f = R_f I_f^2$  или  $P_f = U^2 / R_f$ .

Другая часть энергии теряется в якоре. Не вся электрическая энергия, потребляемая якорем, преобразуется в механическую энергию, – прежде всего потому, что обмотка якоря обладает электрическим сопротивлением. Сопротивление проводников обмотки якоря в реальных машинах достаточно мало, но и это малое сопротивление имеет существенное значение для эффективности работы двигателя.

Электрическая энергия подводится к якору с помощью щеточно-коллекторного устройства. Сопротивление коллекторных пластин, выполненных из меди, чрезвычайно мало, но сопротивление щеток и сопротивление контакта «щетке – коллекторные пластины» значительно. Прохождение тока по этим элементам приводит к дополнительным потерям электрической энергии. Общее сопротивление цепи

якоря  $R_a$ , таким образом, равно сумме сопротивлений щеток  $R_{щ}$ , перехода «щетки – коллекторные пластины»  $R_k$  и проводов обмотки  $R_0$ . Следовательно,  $R_a = R_{щ} + R_k + R_0$

Потери в этих сопротивлениях называют потерями в цепи якоря.

Барабан якоря изготавливают из листовой электротехнической стали, которая является проводящим материалом. При работе двигателя якорь вращается в неподвижном

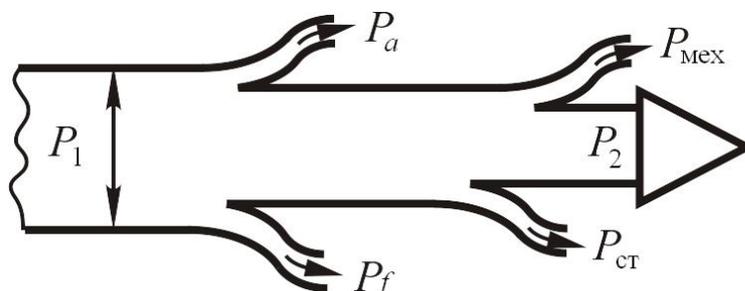


Рис. 8.29

магнитном поле, и это приводит к тому, что сталь якоря постоянно перемагничивается с частотой, кратной частоте вращения якоря. По причине изменения индукции магнитного поля и направления намагничивания стали в якоре возникают вихревые токи. Оба явления связаны с потерями энергии, то есть с превращением электрической энергии в тепловую энергию, которая приводит к нагреву двигателя. Потери на перемагничивание и на вихревые токи называют потерями в стали  $P_{ст}$ . Индукция магнитного поля в статоре и главных полюсах не изменяется во времени, поэтому потери в магнитопроводах этих частей машины практически отсутствуют.

Механическая часть конструкции машины вносит свой вклад в общий объем потерь энергии. В основном говорят о потерях в подшипниках, потерях, связанных с трением щеток о коллектор, и потерях в вентиляторе. Все эти потери связаны с преобразованием механической энергии в тепловую энергию. Мощность потерь, равная сумме мощностей потерь в подшипниках, вентиляторе, потерь, возникающих в результате трения щеток о коллектор, называют механическими потерями  $P_{мех}$ .

### **Энергетическое равновесие в двигателе постоянного тока.**

Потребляемая двигателем постоянного тока из сети электрическая энергия преобразуется:

- в механическую выходную энергию;
- в тепловую энергию цепи обмотки возбуждения;
- в тепловую энергию электрической цепи якоря;
- в тепловую энергию потерь в стали;
- в тепловую энергию механических потерь.

Энергетическое равновесие в двигателе постоянного тока описывается следующим уравнением:

$$P_1 = P_2 + P_a + P_{ст} + P_{мех} + P_f,$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая двигателем из сети;

$P_2$  – мощность полезная на выходе двигателя;

$P_a$  – мощность электрических потерь в цепи якоря;

$P_{ст}$  – мощность потерь в магнитопроводе или в стали машины;

$P_{мех}$  – мощность механических потерь;

$P_f$  – мощность потерь в цепи обмотки возбуждения.

**Якорное управление двигателем** – регулирование частоты вращения якоря двигателей постоянного тока с независимым возбуждением путем изменения напряжения на зажимах якоря двигателя. Напряжение на зажимах обмотки возбуждения или ток обмотки при этом должен оставаться неизменным. При таком способе управления двигателем регулировочное сопротивление не используют, и сопротивление цепи якоря определяется только сопротивлением обмотки якоря  $R_a$ . Тогда  $n = \frac{U - R_a I}{C_e \Phi}$ .

При неизменной величине магнитного потока и сопротивления цепи якоря  $R_a$ , но при различных значениях напряжения питания двигатель будет иметь разные искусственные механические характеристики, проходящие через точку частоты вращения идеального холостого хода,

величина которой определяется из уравнения  $n'_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$  и находится на

оси частот вращения  $n$ . Другая точка механической характеристики

определяется величиной пускового момента:  $M'_п = C_m I'_п \Phi = C_m \frac{U}{R_a} \Phi$ .

Очевидно то, что  $n'_0$  и  $M'_н$  пропорциональны напряжению питания якоря  $U$  и механические характеристики при различных напряжениях  $U$  источника питания цепи якоря параллельны друг другу. Семейство таких характеристик представлено на рис. 8.30.

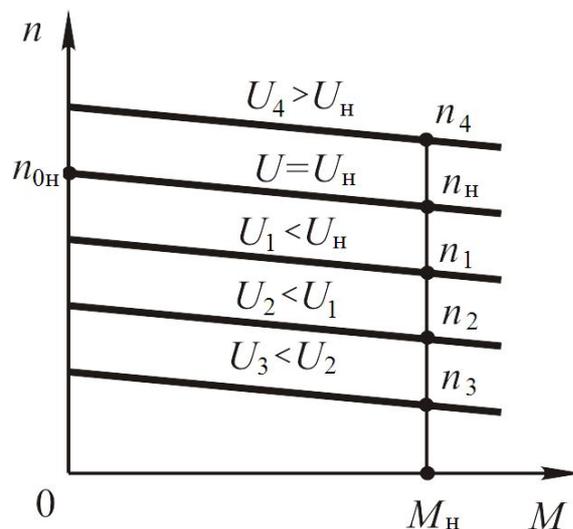


Рис. 8.30

Если двигатель нагружен номинальным моментом  $M_н$ , то каждому напряжению соответствует своя частота вращения, пропорциональная приложенному напряжению  $U$ . Номинальному напряжению  $U_н$  соответствует номинальная частота вращения  $n_н$ . Напряжение меньше номинального  $U_1 < U_н$  обеспечивает меньшую частоту вращения  $n_1 < n_н$ . Аналогично изменяется частота вращения при увеличении напряжения  $U_4 > U_н$  и  $n_4 > n_н$ . Падение напряжения на сопротивлении якоря при неизменном моменте остается постоянным. Увеличение напряжений до значений больше номинального нежелательно, так как частота вращения при этом становится больше номинальной величины, а это может привести к преждевременному износу машины. На практике иногда допускается увеличение напряжения на якоре на 15÷20% выше номинального напряжения.

## 8.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕМЫ

Исходные данные определяются по табл. 8.2 и табл. 7.7 и формулам параграфа 7.6 с заменой в них составляющих  $\left(\frac{230}{U_н}\right)$  и  $\left(\frac{U_н}{230}\right)$

на составляющие  $\left(\frac{220}{U_н}\right)$  и  $\left(\frac{U_н}{220}\right)$ .

Таблица 8.2

Параметры	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная частота вращения $n_n$ , об/мин	750	1000	1500	2200	3000	750	1000	1500	2200	3000
Номинальное напряжение двигателя $U_n$ , В	220	220	220	220	220	110	110	110	110	110

**Задача 8.2.** Определить кратность пускового тока двигателя постоянного тока при непосредственном включении в сеть. КПД двигателя  $\eta = 85\%$ . Вычислить начальное значение сопротивления пускового реостата при условии понижения начального пускового тока до трехкратного номинального.

**Задача 8.3.** Для двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением КПД  $\eta = 78\%$ . Определить величину пускового момента двигателя, если сопротивление пускового реостата  $R_{п} = 1,2$  Ом. Моментом холостого хода и изменением магнитного потока пренебречь.

**Задача 8.4.** Определить момент, потребляемый ток, а также токи в цепях якоря и возбуждения двигателя параллельного возбуждения, если КПД двигателя  $\eta = 81\%$ .

**Задача 8.5.** Двигатель параллельного возбуждения имеет потребляемый ток  $I_{a0} = 0,08 I_{ан}$ . Определить частоту вращения двигателя. Реакцией якоря пренебречь.

**Задача 8.6.** Определить частоту вращения двигателя параллельного возбуждения, КПД которого  $\eta = 80\%$  при уменьшении потребляемого тока вдвое. Принять, что изменение потока, обусловленное реакцией якоря, составляет  $2\%$ .

**Задача 8.7.** Двигатель параллельного возбуждения имеет характеристики, приведенные в табл. 8.3. Механическая характеристика нагрузки линейно возрастает (частоте вращения  $n_1 = 0,1n_n$  соответствует момент  $M_1 = 0,1M_n$ , а  $n_2 = 0,66n_n - M_2 = 0,66M_n$ ). Опреде-

лить угловую частоту вращения двигателя в установившемся режиме работы. Устойчива ли работа двигателя? Для данного режима работы, пренебрегая моментом холостого хода, определить КПД двигателя.

Таблица 8.3

$I, A$	$0,3I_H$	$0,45I_H$	$0,6I_H$	$0,75I_H$	$0,9I_H$	$I_H$
$M, Нм$	$0,25M_H$	$0,4M_H$	$0,55M_H$	$0,7M_H$	$0,85M_H$	$M_H$
$n, об/мин$	$1,033n_H$	$1,027n_H$	$1,02n_H$	$1,01n_H$	$1,005n_H$	$n_H$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Указания для подготовки к экзаменам, зачетам

Чем ближе экзамен, тем больше внимания следует уделять не изучению нового материала, а повторению ранее пройденного.

**Не обольщайтесь мыслью о том, что если вы что-то читаете, вы это повторяете.** Чтение – слишком пассивный процесс. Сводите чтение к минимуму, больше времени уделяйте активным формам усвоения материала.

**Составляйте резюме по всему, что вы читаете и повторяете.** Затем просматривайте эти резюме и старайтесь мысленно восстановить отсутствующие детали. Сводите к минимуму работу над тем материалом, который может изучаться по усмотрению учащегося.

**Любой материал старайтесь повторять чаще и уж, во всяком случае, не единожды.** Чем чаще вы освежаете в своей памяти пройденный материал, тем лучше понимаете и запоминаете его.

Умение запоминать прочитанное исключительно важно для обучения. Внимательно изучите предлагаемые ниже рекомендации, которые могут оказаться для вас полезными.

– При составлении резюме не нужно переписывать целые предложения или абзацы. Выписываются только ключевые идеи и фразы по мере прочтения текста.

– Задержите свое внимание на вводном предложении каждого абзаца; это особенно важно, если абзацы большие.

– Постарайтесь не пропустить так называемые слова (фразы) – сигналы типа «подводя итог сказанному», «таким образом», «из этого следует», «суть вопроса состоит», «это означает» и т.п. Они употребляются специально для того, чтобы заострить внимание читателя на чем-то важном.

– Вдумчиво ознакомьтесь с выводами автора.

– Сразу же после прочтения проверьте, что вы запомнили, и отразите мысли и факты в виде схемы.

**Работайте короткими и интенсивными периодами с перерывами.** Концентрировать внимание можно в течение минут, но не часов. Процесс активного обучения не может продолжаться в течение длительного времени (только такие задания, как рефераты или доклады, можно писать несколько часов подряд).

Практикуясь с экзаменационными вопросами, не пишите каждый раз полные ответы. Часть ответов записывайте в **конспективной форме** – так вы сможете охватить большее число вопросов.

**Имейте в виду, что чем чаще вы обращаетесь к предложенным в пособии задачам, тем лучше будете разбираться в их решении.** Следовательно, столкнувшись во время экзамена с подобной задачей, вы будете знать, что её решение займёт у вас меньше времени, чем отводится на нее в среднем, и что таким образом у вас появляется резерв времени для подготовки ответов на остальные вопросы.

При подготовке к экзамену полезно выполнить следующее в указанной последовательности:

- просмотреть учебный материал для повторения;
- подчеркнуть ключевые фразы;
- обвести цветными чернилами те фразы, расшифровка которых может вызвать определенные трудности;
- составить логическую схему ответа;
- сформулировать вопросы к тексту, представив себя как бы на месте экзаменатора;
- ответить на эти вопросы и проверить по тексту правильность ответа.

В пособии изложены принцип действия и особенности конструкции машины постоянного тока. Рассмотрен расчет магнитной цепи МПТ и описана главная электрическая цепь, т.е. схемы обмоток якоря МПТ. Рассмотрено магнитное поле машины постоянного тока, описываются особенности процессов коммутации МПТ. При изложении теории генераторов и двигателей постоянного тока учтены современные тенденции развития МПТ, направленные на повышение их надежности, энергетических показателей, улучшение характеристик и снижение затрат на их производство и эксплуатацию.

Знания и умения, полученные студентами в ходе работы с данным пособием, могут быть применены в их профессиональной деятельности при решении следующих вопросов:

- улучшения конструкций магнитных систем и обмоток МПТ с целью снижения массы, габаритных размеров МПТ, потерь энергии в них;
- повышения надежности путем улучшения качества изоляции обмоток и коммутации МПТ;
- создания новых схем МПТ, сочетающих в себе электромагнитную систему с элементами полупроводниковой техники;
- разработки более технологичных конструкций МПТ, приспособленных для массового и серийного производства.

При этом учитывается, что техническое образование требует нового подхода к изучению курса электрических машин, который интегрирует знание теоретических и общенаучных дисциплин и дает практические навыки инженерной деятельности.

При изучении материала данного пособия необходимо помнить, что достижения науки и техники, обусловленные ускорением научно-технического прогресса, способствуют совершенствованию всех отраслей промышленности и транспорта. В первую очередь это относится к электрическим машинам, составляющим основу различных электроприводов и применяющимся в электроэнергетике – как в процессе производства электроэнергии, так и в процессе ее потребления.

Стоит также отметить, что в настоящее время ведутся интенсивные работы по улучшению коммутации МПТ. Интересны опыты с применением углеграфитовых коллекторов. С большим успехом ве-

дуться работы по вентильной и вентильно-механической коммутации, когда полупроводниковые вентили встраиваются в машину.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Кацман М.М. Электрические машины: учебник / М.М. Кацман. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2003. – 469 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – В 2 ч. Ч. 1. Машины постоянного тока и трансформаторы / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1957. – 464 с.
4. Токарев Б.Ф. Электрические машины: учеб. пособ. для вузов / Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
5. Хвостов В.С. Электрические машины: Машины постоянного тока: учебник / В.С. Хвостов; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.
6. Электрические машины. – В 3 ч. Ч. 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока / Под ред. Г.Н. Петрова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 224 с.
7. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: учеб. для электротехн. вузов. – В 2 ч. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 319 с.
8. Шпаннеберг Х. Электрические машины: 1000 понятий для практиков: справочник / Х. Шпаннеберг. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 252 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
Глава 1. Методические рекомендации по работе с пособием.....	11
1.1. Самостоятельное освоение учебного материала как способ организации учебной деятельности студентов.....	11
1.2. Как использовать учебную и справочную литературу .....	17
1.3. Рекомендации по решению задач.....	19
1.4. Составление резюме прочитанного.....	22
1.5. Построение схем и диаграмм при чтении учебника .....	23
1.6. Составление собственного банка вопросов .....	24
1.7. Методические рекомендации по составлению вопросов и самоконтролю.....	27
Глава 2. Понятия и определения, используемые при изучении электрических машин.....	34
Глава 3. Принцип действия и конструкция машин постоянного тока.....	42
3.1. Основные вопросы изучаемой темы .....	42
3.2. Цели и задачи изучения темы .....	42
3.3. Типовые задачи темы .....	43
3.4. Тезаурус понятий темы .....	48
Глава 4. Магнитная цепь машины постоянного тока.....	76
4.1. Основные вопросы изучаемой темы .....	76
4.2. Цели и задачи изучения темы .....	76
4.3. Задания по работе с книгой .....	76
4.4. Типовые задачи темы .....	78
4.5. Тезаурус понятий темы .....	81
4.6. Контрольные задачи темы .....	84
Глава 5. Обмотки якоря коллекторных машин постоянного тока .....	87
5.1. Основные вопросы изучаемой темы .....	87
5.2. Цели и задачи изучения темы .....	87
5.3. Задания по работе с книгой .....	89
5.4. Типовые задачи темы .....	89
5.5. Тезаурус понятий темы .....	100
5.6. Контрольные задачи темы .....	109
Глава 6. Магнитное поле машин постоянного тока. Коммутация обмоток якоря машин постоянного тока.....	110

6.1. Основные вопросы изучаемой темы .....	110
6.2. Цели и задачи изучения темы .....	111
6.3. Задания по работе с книгой .....	114
6.4. Типовые задачи темы .....	115
6.5. Тезаурус понятий темы .....	129
6.6. Контрольные задачи темы .....	149
Глава 7. Генераторы постоянного тока.....	151
7.1. Основные вопросы изучаемой темы .....	151
7.2. Цели и задачи изучения темы .....	152
7.3. Задания по работе с книгой .....	155
7.4. Типовые задачи темы .....	155
7.5. Тезаурус понятий темы .....	163
7.6. Контрольные задачи темы .....	200
Глава 8. Двигатели постоянного тока .....	205
8.1. Основные вопросы изучаемой темы .....	205
8.2. Цели и задачи изучения темы .....	206
8.3. Задания по работе с книгой .....	208
8.4. Типовая задача темы .....	208
8.5. Тезаурус понятий темы .....	215
8.6. Контрольные задачи темы .....	255
Заключение .....	257
Библиографический список.....	261

Учебное издание

**Машины постоянного тока**  
**Тезаурус, вопросы, задачи**

*ВЫСОЦКИЙ Виталий Евгеньевич,*  
*ГОРЯЧЕВ Владимир Яковлевич*  
*ТУЛУПОВ Павел Владимирович*

Редактор *Т.Г. Трубина*  
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*  
Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подписано в печать 01.09.09.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. п. л. 15,11. Уч.-изд. л. 15,08.  
Тираж 100 экз. Рег.№ 346/09.

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8