

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

И.Н. Дубровский, В.И. Костюченко

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Допущено УМО вузов России по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки
140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»
специальности 140601 – «Электромеханика»

Комсомольск-на-Амуре
2012

УДК 621.313(07)

ББК 31.261я7

Д797

Рецензенты:

Кафедра «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
профессор кафедры д-р техн. наук В. Я. Беспалов;
Н. Ф. Котеленец, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика»
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»

Дубровский, И. Н.

Д797 Электрические машины : учеб. пособие / И. Н. Дубровский, В. И. Костюченко. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2012. – 160 с.

ISBN 978-5-7765-0941-4

В учебном пособии изложены устройство, принцип действия и вопросы теории электрических машин переменного и постоянного тока. При изложении учебного материала основной упор сделан на раскрытие физической сущности явлений и процессов, происходящих в электрических машинах.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений электротехнических и электроэнергетических специальностей, может быть использовано для инженеров электротехнических специальностей.

УДК 621.313(07)

ББК 31.261я7

ISBN 978-5-7765-0941-4

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального
образования «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	5
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.	7
1.1. Классификация электрических машин.	7
1.2. Устройство машин постоянного тока.	10
1.3. Принцип действия машин постоянного тока.	15
1.4. Понятие об обмотках якоря машин постоянного тока.	19
1.5. Магнитная цепь машины постоянного тока.	28
1.6. Кривая намагничивания машины постоянного тока.	30
1.7. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока.	31
1.8. Реакция якоря в машине постоянного тока.	33
1.9. Коммутация в машинах постоянного тока.	37
1.10. Потери и коэффициент полезного действия машин постоянного тока.	46
2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.	49
2.1. Классификация и основные уравнения генераторов.	49
2.2. Основные характеристики генераторов постоянного тока.	52
2.3. Самовозбуждение генераторов постоянного тока.	57
3. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.	58
3.1. Классификация и основные уравнения двигателей.	58
3.2. Основные характеристики двигателей постоянного тока.	60
3.3. Пуск двигателей постоянного тока.	64
3.4. Регулирование частоты вращения двигателей.	67
3.5. Останов двигателей.	73
4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	74
4.1. Общие вопросы машин переменного тока.	74
4.2. Устройство многофазных обмоток.	75
4.3. Вращающееся магнитное поле.	78
4.4. ЭДС, индуцируемые в обмотках машин переменного тока	81
5. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ	90
5.1. Устройство трехфазных асинхронных двигателей.	90
5.2. Принцип действия трехфазных асинхронных двигателей.	93
5.3. Работа асинхронной машины при заторможенном роторе.	96
5.4. Работа асинхронной машины при вращающемся роторе.	100
5.5. Схема замещения асинхронной машины.	103
5.6. Электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронной машины.	108
5.7. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.	110

5.8. Пуск асинхронных двигателей.	114
5.9. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей. .	119
6. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.	123
6.1. Устройство трехфазных синхронных машин.	123
6.2. Системы возбуждения синхронных машин.	127
6.3. Принцип действия синхронных машин.	128
6.4. Работа синхронного генератора при холостом ходе.	129
6.5. Работа синхронного генератора под нагрузкой.	131
6.6. Векторные диаграммы синхронного генератора без учета насыщения.	135
6.7. Характеристики синхронного генератора.	138
6.8. Регулирование активной мощности.	143
6.9. Статическая устойчивость.	147
6.10. Регулирование реактивной мощности.	148
6.11. Синхронные двигатели.	151
6.12. Угловые и U-образные характеристики синхронного двигателя.	153
6.13. Рабочие характеристики синхронного двигателя.	155
6.14. Пуск в ход синхронного двигателя.	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	158
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	159

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические науки и электромашиностроение принадлежат к молодым отраслям человеческого знания. Электромашиностроение насчитывает практически всего около двух веков. За этот относительно небольшой период времени проделана огромная работа, преобразившая техническое и экономическое лицо современной промышленности и общественной жизни. В основе современной электротехники лежат два тесно связанных физических явления – магнетизм и электричество.

Благодаря работам М. Фарадея, Б. Якоби, Э. Ленца и Х. Эрстеда магнетизм и электричество могут рассматриваться как единый электромагнитный процесс, который, по существу, и лежит в основе работы электрических машин. Исходными положениями для создания электрической машины послужили открытие Эрстедом в 1820 г. явления электромагнетизма и открытие Фарадеем в 1822 г. электромагнитного вращения рамки с током в магнитном поле. Опыты М. Фарадея показывают принцип преобразования электрической энергии в механическую и дают возможность выполнить электрический двигатель. М. Фарадей в 1831 г. открыл явление электромагнитной индукции, послужившей основой для изобретения электрического генератора.

В 1833 г. русский академик Э. Х. Ленц обобщил оба явления (электрического вращения и электромагнитной индукции) и показал, что электрическая машина может работать как двигателем, так и генератором, т. е. установил принцип обратимости электрических машин.

Дальнейшее развитие идеи взаимного преобразования электрической и механической энергии получили в работах выдающихся русских ученых Б. С. Якоби и М. О. Доливо-Добровольского, которыми были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, пригодных для практического использования. Так, в 1838 г. Б. С. Якоби создал многополюсный электродвигатель мощностью 0,5 кВт, который был установлен на катере. Источником электрической энергии служили гальванические элементы.

Продолжительный период времени электрический генератор и электрический двигатель развивались самостоятельно и только в 70-х гг. XIX в. пути их развития объединились. К этому времени был полностью освоен принцип обратимости электрических машин, появилась возможность питания двигателей от генераторов. С этого времени началось бурное развитие электрических машин постоянного тока.

По мере развития и совершенствования машин постоянного тока все полнее выяснялись недостатки в передаче и распределении электрической энергии в форме постоянного тока. Поэтому предпринимаются практические шаги в получении и использовании переменного тока.

Впервые переменный ток для освещения использовал русский изобретатель П. Н. Яблочков в 1877 г. Для этой цели в 1876 г. он совместно с заводом Грамма во Франции разработал конструкцию однофазного синхронного генератора. По своему принципу этот генератор послужил прототипом современных синхронных машин.

Дальнейшее совершенствование синхронных генераторов связано с широким использованием трехфазного переменного тока, получившего развитие в конце прошлого столетия благодаря работам замечательного ученого и инженера М. О. Доливо-Добровольского. Он, исследуя варианты соединения многофазных цепей, открыл возможность получения вращающегося магнитного поля при помощи трехфазного тока и на этой основе в 1889 г. изобрел трехфазный короткозамкнутый асинхронный двигатель.

В 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский создал конструкцию трехфазного трансформатора.

В 1891 г. система трехфазного тока демонстрировалась на международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне для передачи электрической энергии на расстояние 170 км. Система состояла из трехфазного синхронного генератора мощностью 230 кВт, повышающего трансформатора до 15 000 В, линии передачи 170 км, двух понижающих трансформаторов, один из которых напряжением 113 В питал асинхронный трехфазный двигатель мощностью 75 кВт. Испытания представленной трехфазной системы дали настолько блестящие результаты, что она нашла всеобщее признание и к началу текущего столетия получила преобладающее распространение в мировой практике создания электроэнергетических систем.

Славные традиции русских электротехников XIX в. продолжили ученые и инженеры нашей страны. Сейчас Россия является мощной индустриальной державой и во многих областях электроэнергетики и электропромышленности занимает ведущее место в мире.

В настоящее время создаются разнообразные устройства с электронными, полупроводниковыми и электромагнитными элементами, автоматические промышленные роботы манипуляторы. С их помощью совершенствуются технологические процессы, системы управления, контроля и информации.

Без использования электротехники немислимы были бы успехи в медицине, биологии, экологии и в других отраслях науки.

В развитие отечественного специального электромашиностроения большой вклад внесли советские ученые, среди которых В. С. Кулебакин, В. И. Полонский, В. П. Вологдин Л. Н. Ларионов и др.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Классификация электрических машин

Электрическая машина, действие которой основано как на использовании явления электромагнитной индукции, так и электростатической индукции, служит для преобразования механической энергии в электрическую или наоборот, а также электрической энергии в электрическую энергию с другими параметрами. Электрические машины, в которых используется явление электромагнитной индукции, называют индукционными, а электрические машины, принцип действия которых основан на электростатической индукции, – емкостными. На практике наибольшее распространение получили индукционные машины, в которых подвижная часть вращается, изменяя свое угловое положение относительно статора. Такие машины называются вращающимися, а их подвижная часть – ротором.

Электрические машины чрезвычайно разнообразны. Поэтому для упрощения их изучения, выявления общих закономерностей, характеристик, устройства и т. д. принято классифицировать электрические машины по ряду признаков: по назначению, роду тока, мощности, частоте вращения, (рис. 1.1), которые наиболее характерны для электрических машин, применяемых во всех сферах человеческой деятельности.

Классификация по назначению. Электрические машины по назначению подразделяют на следующие виды:

- электрические генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Электрические генераторы используют на электрических станциях и различных транспортных установках: автомобилях, самолетах, тепловозах, кораблях, передвижных электростанциях и др.;

- электрические двигатели преобразуют электрическую энергию в механическую. Они приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства, применяемые на транспорте, в промышленности, сельском хозяйстве и в быту;

- электромашинные преобразователи преобразуют переменный ток в постоянный и наоборот, а также изменяют величину постоянного и переменного напряжений, частоту, число фаз и др. Они широко используются в промышленности, на транспорте и др.;

- электромеханические преобразователи сигналов генерируют, преобразуют и усиливают различные сигналы. Они широко используются в системах автоматического управления и регулирования, в измерительных и счетно-решающих устройствах в качестве различных датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов и др.

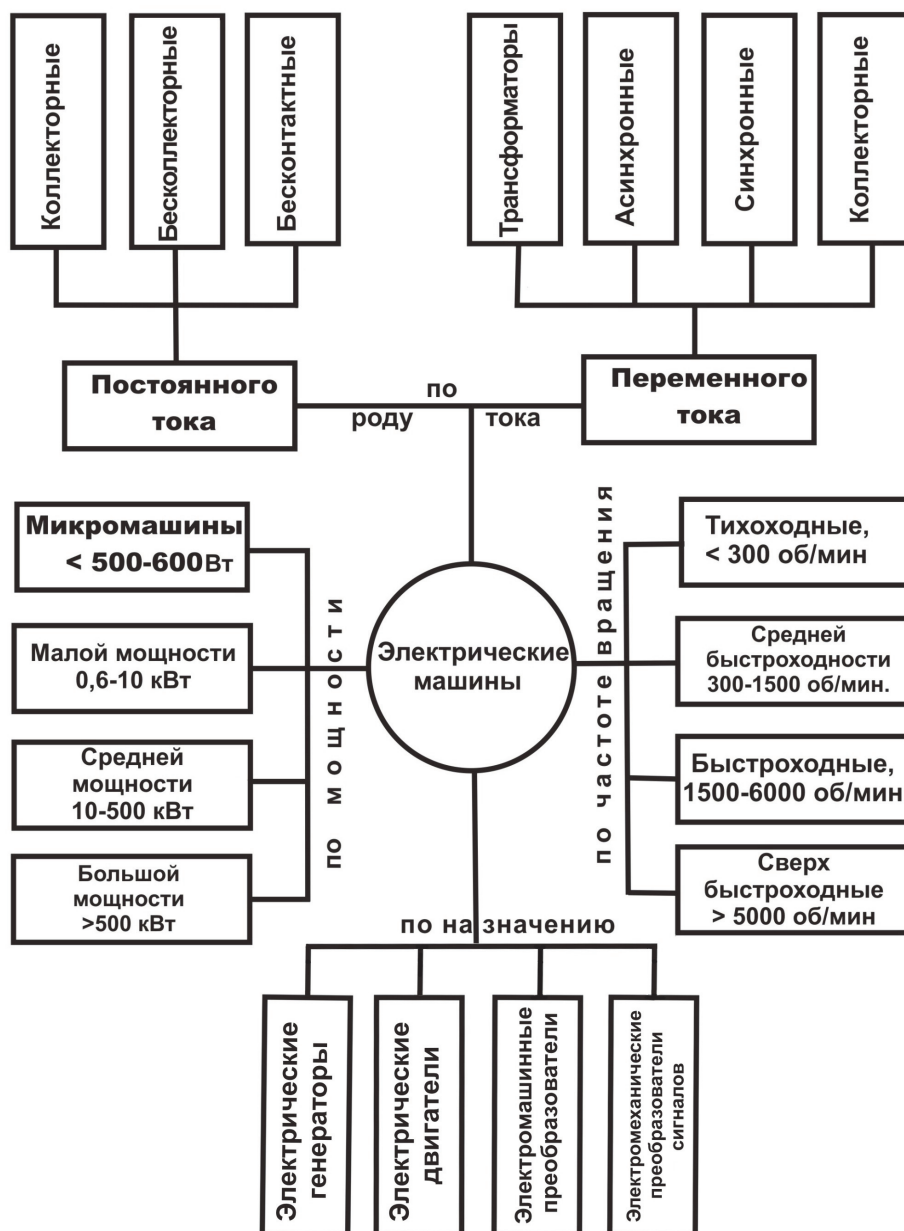


Рис. 1.1. Классификация электрических машин

Классификация по роду тока. Электрические машины по роду тока делят на машины постоянного и переменного тока.

Машины переменного тока подразделяют на трансформаторы, асинхронные, синхронные и коллекторные машины.

Трансформаторы широко применяют для преобразования напряжения в системах передачи и распределения электрической энергии, выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники. В системах автоматического регулирования широко используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы и др.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях и генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на самолетах, кораблях и т.п.). В электроприводах большой мощности используют также синхронные электродвигатели. В устройствах автоматики широко применяют различные синхронные машины малой мощности (реактивные, с постоянными магнитами, гистерезисные, индукторные, сельсины и пр.).

Коллекторные машины переменного тока применяются главным образом в качестве электродвигателей. В устройствах автоматики, а также в разного рода электробытовых приборах применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие на постоянном и переменном токе.

В настоящее время наиболее широко применяются машины постоянного тока с механическим коммутатором, выполненным в виде коллектора с системой щеток. Машины с таким коммутатором получили название – коллекторные.

Машины постоянного тока применяют в качестве генераторов и двигателей в устройствах, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах (железнодорожный и морской транспорт, прокатные станы, электротрансмиссии большегрузных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и пр.), а также в случаях, когда источниками электрической энергии для питания электродвигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т.п.).

Генераторы постоянного тока часто применяют для питания устройств связи, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве основных источников питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, тепловозах, пассажирских вагонах). Однако в последнее время генераторы постоянного тока заменяют генераторами переменного тока, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

Классификация по мощности. По мощности электрические машины можно разделить на микромашины, машины малой, средней и большой мощности.

Микромашины имеют мощность от долей ватта до 600 Вт. Они работают на постоянном или переменном токе промышленной (50 Гц) или повышенной частоты (400...2000 Гц).

Машины малой мощности – от 0,6 до 10 кВт. Работают на постоянном или переменном токе 50 Гц или повышенной частоты.

Машины средней мощности – от 10 кВт до нескольких сотен киловатт на постоянном или переменном токе промышленной частоты, а для трансформаторов – 1000 кВт·А.

Машины большой мощности – свыше нескольких сотен киловатт на постоянном или переменном токе 50 Гц.

Классификация по частоте вращения. По частоте вращения электрические машины можно подразделить:

- на тихоходные – с частотой вращения до 300 об/мин;
- средней быстроходности – 300...1500 об/мин;
- быстроходные – 1500...6000 об/мин;
- сверхбыстроходные – свыше 6000 об/мин.

Микромашины выполняют для частот вращения от нескольких оборотов в минуту до 60 000 об/мин; машины большой и средней мощности – обычно до 3000 об/мин.

Электрические машины являются основными элементами любой энергетической системы.

Поэтому для специалистов, работающих как в сфере производства, так и в сфере эксплуатации, необходимы прочные знания теории электрических машин, понимание физической сущности электромагнитных, механических и тепловых процессов, протекающих в электрической машине.

1.2. Устройство машин постоянного тока

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготавливают электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в самых различных условиях. Поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова.

Устройство машины постоянного тока показано на рис. 1.2.

Статор состоит из станины 6, главных полюсов 4. Станина 6 служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину машин относительно небольшой мощности изготавливают из отрезков цельнотянутых стальных труб, а станину мощных машин сваривают из толстолистового стального проката. В нижней части станины имеются лапы 11 для крепления машины к фундаментной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов 4.

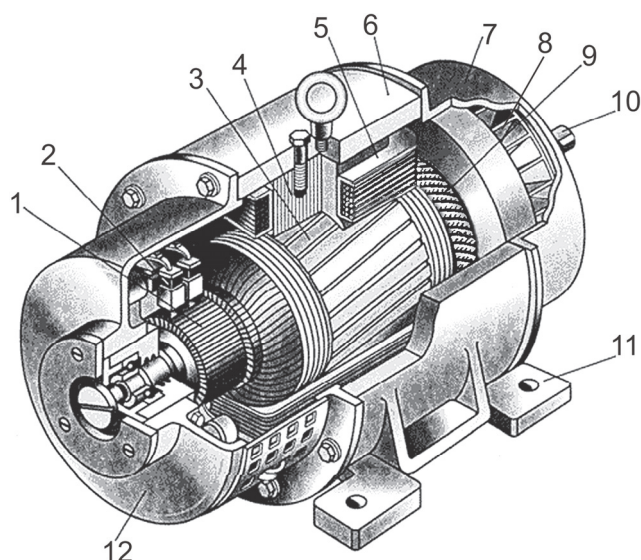


Рис. 1.2. Устройство электрической машины постоянного тока:

1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – якорь; 4 – сердечник главного полюса;
 5 – обмотка возбуждения; 6 – станина; 7 – передний подшипниковый щит;
 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря; 10 – вал; 11 – лапа; 12 – задний подшипниковый щит

На сердечниках главных полюсов размещают обмотку возбуждения 5, которую изготавливают в виде катушек из медных изолированных проводников круглого или прямоугольного сечения. Изолированные катушки насаживают на сердечник полюса и закрепляют стальными пружинящими рамками. Иногда для увеличения поверхности охлаждения катушку делят на две части. Полюс с надетой на него катушкой прикрепляют к станине болтами. Дополнительные полюсы располагают между главными полюсами и вместе с катушками их обмотки болтами прикрепляют к станине.

В магнитном отношении статор имеет две оси симметрии: продольную d , совпадающую с осью главных полюсов и обмотки возбуждения, и поперечную q , перпендикулярную продольной (смещенную на 90° электрических).

Ротор машины постоянного тока состоит из шихтованного сердечника якоря 3 с обмоткой и коллектора 1. Сердечник якоря и коллектор закрепляют на валу 10. Сердечник собирается из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм для снижения потерь от вихревых токов. Сердечник якоря при длине 25 см выполняется из одного пакета, а при большей длине – из нескольких пакетов. Между пакетами с помощью специальных распорок создают вентиляционные каналы, предназначенные для улучшения охлаждения обмоток и сердечника якоря. В листах якоря предусмотрены пазы для укладки его обмотки. Обмотку в пазах закрепляют клином или бандажами, располагаемыми в кольцевых канавках сердечника якоря. Лобовые части обмотки защищают от действия центробежных сил бандажами из проволоки или стеклоленты.

Станина 6, сердечники полюсов 4 и якоря 3 являются участками магнитопровода, по которым замыкается основной магнитный поток возбуждения. Для уменьшения магнитного сопротивления на пути этого потока все указанные участки выполняют из стали. С этой же целью стараются уменьшить воздушный зазор между якорем и полюсами. Из-за зубчатого строения якоря индукция в воздушном зазоре содержит высшие гармоники, которые будут наводить в полюсном наконечнике вихревые токи. Для их уменьшения полюсный наконечник и сердечник полюса также собирают из отдельных листов стали толщиной 1...2 мм.

По коллектору 1 скользят неподвижные щетки 2, закрепленные в щеткодержателях, установленных на цилиндрических или призматических пальцах, которые, в свою очередь, укреплены в заднем подшипниковом щите 12. Обычно число пальцев выбирают равным числу полюсов.

Ротор вращается в подшипниках, которые размещены в подшипниковых щитах: передний 7 и задний 12. В переднем подшипниковом щите на валу установлен вентилятор 8. Вентилятор служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

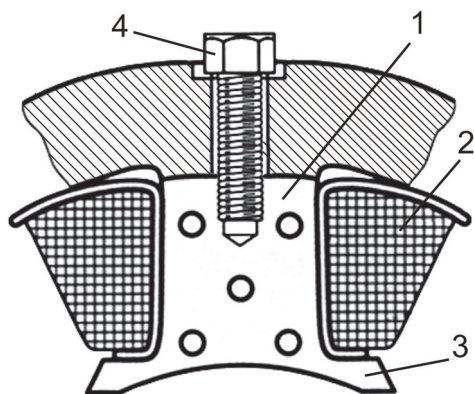


Рис. 1.3. Главный полюс:
1 – сердечник полюса; 2 – катушка обмотки возбуждения; 3 – полюсный наконечник; 4 – болт

На заднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осматривать коллектор и щетки.

На заднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осматривать коллектор и щетки.

Главные полюсы (рис. 1.3) состоят из сердечника 1, на которых размещены катушки 2 обмотки возбуждения. Главные полюсы собирают из штампованных листов стали. Стальные листы спрессовывают в пакет и скрепляют стальными заклепками,

число которых должно быть не менее четырех. Крайние листы полюса выполняют из более толстой стали (4...10 мм) во избежание их распухания. Чтобы получить необходимый характер распределения магнитного поля в воздушном зазоре, полюсный наконечник 2 должен иметь определенную форму.

Воздушный зазор между полюсами и якорем должен быть одинаковым по всей ширине полюсного наконечника либо под краями наконечника его делают больше, как в синхронных машинах. В полюсе имеется отверстие с резьбой, в которое вворачивается болт 4, крепящий полюс к станине.

Коллектор состоит из большого количества электрически изолированных друг от друга пластин (рис. 1.4), отштампованных из профильной меди. Для изоляции между медными пластинами 3 устанавливают тонкие прокладки 7, вырубленные из миканита. Форма прокладок повторяет форму медных пластин. Набор коллекторных пластин с прокладками должен быть прочно скреплен и иметь строго цилиндрическую форму. К каждой коллекторной пластине присоединяют вывод от каждой секции обмотки якоря, для чего со стороны, обращенной к якорю, у них имеются выступы 6, называемые «петушками», в которых выфрезерованы шлицы. В этих шлицах с помощью сварки или пайки закрепляют выводы от обмотки якоря.

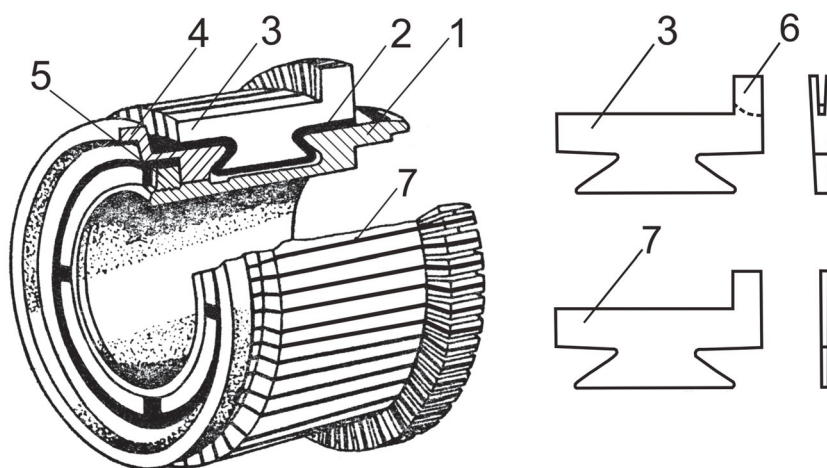


Рис. 1.4. Устройство коллектора на стальной втулке:

1 – стальная втулка; 2 – миканитовые изоляционные манжеты; 3 – коллектор;
4 – нажимной фланец; 5 – контргайка; 6 – «петушок»; 7 – миканитовая пластина

Коллекторы электрических машин по конструкции и технологии изготовления можно разделить на следующие основные типы: коллекторы со стальными втулками арочного типа (см. рис. 1.4); коллекторы с бандажными кольцами; коллекторы на пластмассе.

Каждый тип коллекторов включает в себя большое количество видов. Коллекторные пластины 3 зажимаются между стальной втулкой (корпусом) 1 и стальным нажимным фланцем 4, который предохраняет от сползания контргайка 5. Для изоляции пластин коллектора от втулки и фланца служат миканитовые манжеты 2.

В машинах постоянного тока малой мощности часто применяют коллекторы на пластмассе, отличающиеся простотой в изготовлении. Набор медных и миканитовых пластин в таком коллекторе удерживается пластмассой, запрессованной в пространство между набором пластин и стальной втулкой. Иногда с целью увеличения прочности коллектора эту пластмассу армируют стальными кольцами (бандажами).

На рис. 1.5 показаны два типа щеткодержателей, применяемых в машинах постоянного тока: с перемещением щетки в радиальном и наклонном по отношению к поверхности коллектора направлениях. Наиболее распространенными являются щеткодержатели с радиальным расположением щетки (см. рис. 1.5, *а*). Наклонные же (реактивные) щеткодержатели (см. рис. 1.5, *б*) применяют для машин с односторонним направлением вращения.

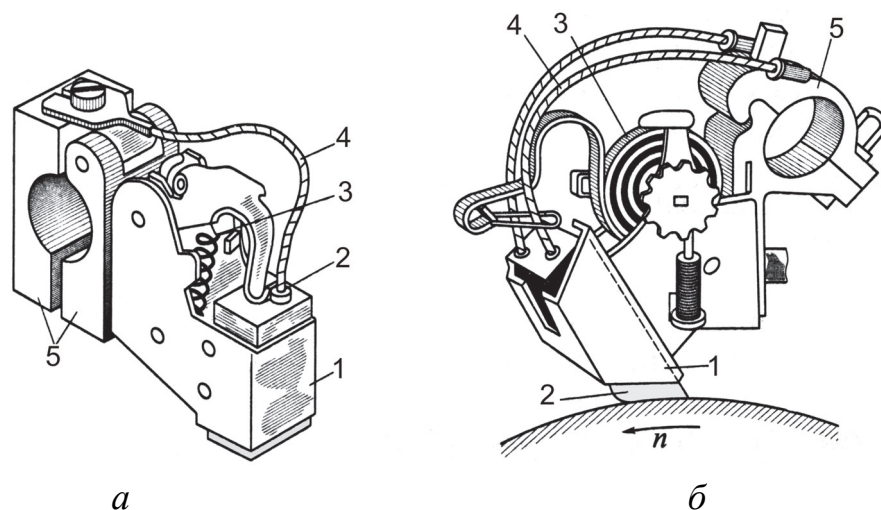


Рис. 1.5. Устройство щеткодержателей с радиальным (*а*) и наклонным (*б*) расположением щеток:

1 – щеткодержатель; 2 – щетка; 3 – пружина; 4 – электрический вывод; 5 – колодки

Щетка 2, устанавливаемая в щеткодержателе 1, прижимается к коллектору пружиной 3. Для закрепления щеткодержателя на щеточном болте служат колодки 5, к которым присоединен электрический вывод (гибкий канатик) 4 от щетки 2. Щетки работают в тяжелых условиях. Они могут сильно нагреваться током нагрузки, коммутационными токами, а также под действием сил трения. Щетки имеют сложный состав. Наиболее широкое применение нашли щетки следующих типов: ЭГ – электрографитные; МГ – меднографитные; СГ – серебрянографитные; МС – меднографитосвинцовистые; МГС-7, МГС-8 и МГС-9 – меднографитосвинцовистооловянные.

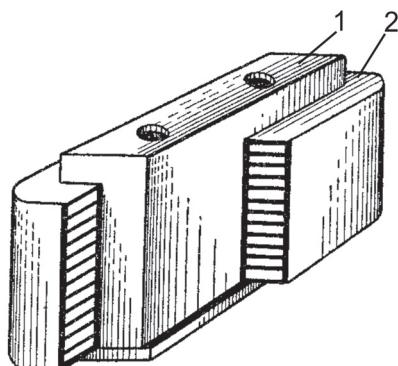


Рис. 1.6. Дополнительный полюс:
1 – сердечник; 2 – катушка обмотки
добавочных полюсов

Дополнительные полюсы (рис. 1.6) предназначены для улучшения работы щеточного контакта (уменьшения искрения). Сердечники дополнительных полюсов могут

изготавливаться цельными из полосовой стали или собираться из отдельных листов электротехнической стали толщиной 1 мм.

Дополнительные полюса располагают между главными полюсами и крепят к станине болтами.

На станине машины закреплена соединительная коробка (клеммная плата), предназначенная для соединений проводов, отходящих от обмоток полюсов машины и от щеток.

Маркировка обмоток машины постоянного тока в соответствии с ГОСТ 26772–85 обозначается следующим образом:

- обмотка якоря $A1(Я1)$ и $A2(Я2)$;
- параллельная обмотка возбуждения (шунтовая) $E1(Ш1)$ и $E2(Ш2)$;
- последовательная обмотка возбуждения (сериесная) $D1(C1)$ и $D2(C2)$;
- обмотка дополнительных полюсов $B1(Д1)$ и $B2(Д2)$;
- компенсационная обмотка $C1(K1)$ и $C2(K2)$;
- независимая обмотка возбуждения $F1(H1)$ и $F2(H2)$.

В скобках указана маркировка в соответствии с ГОСТ 183–74. Цифрой 1 обозначены начала обмоток, а цифрой 2 – концы.

1.3. Принцип действия машин постоянного тока

Характерным признаком машин постоянного тока является наличие у них коллектора – механического коммутатора, преобразующего переменный ток в постоянный (выпрямитель) и наоборот (инвертор). Необходимость в таком коммутаторе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Принцип действия генератора

Принцип действия генератора постоянного тока рассмотрим на примере упрощенной модели, изображенной на рис. 1.7.

Между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора – якорь, вал которого связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) – источником механической энергии. На поверхности якоря в диаметральной плоскости расположена обмотка в виде одного витка (контура) $abcd$, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки А и В, осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением R .

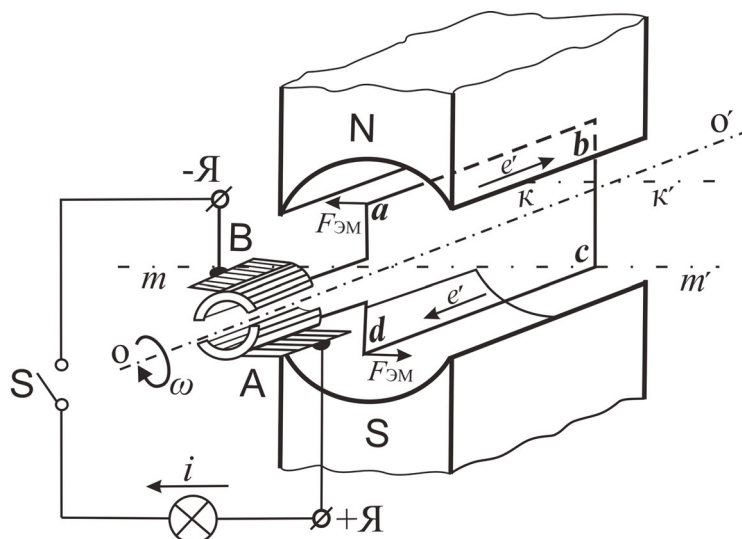


Рис. 1.7. Упрощенная модель машины постоянного тока

Предположим, контур $abcd$ вращается в однородном магнитном поле с магнитной индукцией $\vec{B}$ с постоянной угловой скоростью ω в направлении часовой стрелки.

В таком генераторе каждый оборот соответствует одному полному периоду T и угловая скорость равна:

$$\omega = 2\pi f.$$

Число периодов в секунду называется частотой f :

$$f = \frac{1}{T}.$$

Единицей измерения частоты является с^{-1} или герц (Гц), угловая частота измеряется в рад/с.

При вращении плоскость контура меняет свое положение по отношению к магнитному полю и угол α между плоскостью контура и плоскостью, перпендикулярной к направлению поля (рис. 1.8), изменяется пропорционально времени $\alpha = \omega t$.

В соответствии с этим магнитный поток Φ , пронизывающий контур, изменяется при вращении пропорционально косинусу угла α :

$$\Phi = B_m 2rl \cos \alpha = \Phi_m \cos \omega t,$$

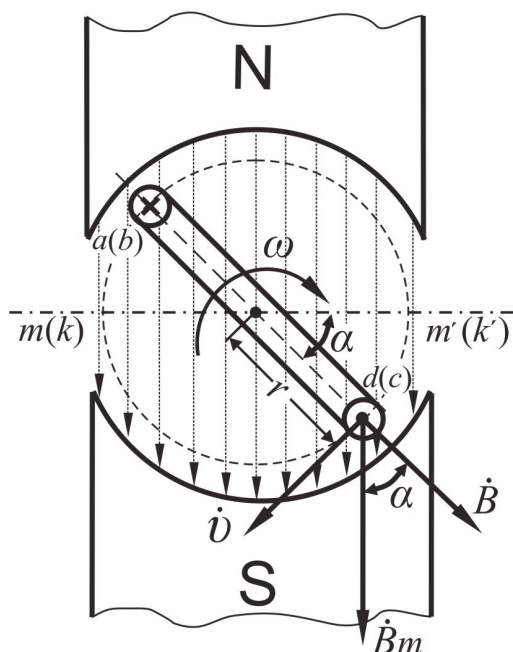


Рис. 1.8. К принципу действия машин постоянного тока

где l – активная длина контура, м; $2rl$ – площадь контура, м²; а $\Phi_m = B_m 2rl$ – максимальное значение потока, Вб, пронизывающего контур.

Электродвижущая сила (ЭДС), наводимая (индуцируемая) во вращающейся обмотке, определяется в соответствии с законом Фарадея-Максвелла как:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} = \omega w \Phi_m \sin \omega t.$$

Так как поток Φ является потокосцеплением одного витка, потокосцепление контура $\Psi = w\Phi$, где w – число витков вращающейся обмотки.

Обмотку предполагаем осуществленной таким образом, что все витки ее лежат в одной плоскости и пронизываются в любой момент одним и тем же магнитным потоком.

То же выражение для индуцируемой ЭДС получим, если просуммируем ЭДС e' , наводимые на отдельных так называемых активных участках каждого витка (ab и cd) при движении их в магнитном поле с линейной скоростью v м/с, $v = 2\pi r f = \omega r$ в результате пересечения магнитных индукционных линий:

$$e' = l B_m v \sin(\dot{B} \dot{v}) = l v B_m \sin \alpha = l B_m v,$$

$$e = 2we' = 2wl\omega r B_m \sin \omega t = \omega w \Phi_m \sin \omega t.$$

Направление ЭДС зависит от места перемещения проводника. Например, при перемещении проводника ab под северным полюсом ЭДС, согласно правилу правой руки, направлена от нас, а при перемещении проводника ab под южным полюсом ЭДС изменяет свое направление на 180 градусов. Поэтому в витке $abcd$ индуцируется переменная ЭДС.

Знак ЭДС витка изменяется при переходе плоскости витка через плоскость, проходящую по линиям mm' и kk' . Линия mm' (kk') проходит точно посередине между полюсами N и S и называется геометрической нейтралью (поперечная ось q). Чтобы на зажимах генератора (+ Я, - Я) получить ЭДС одного знака, требуется, как показано на рис. 1.7, введение в конструкцию генератора коллектора. Он позволяет обеспечить вполне определенную полярность щеток: щетка А будет иметь полярность «плюс», а щетка В – «минус».

При замыкании ключа S по внешнему участку цепи, в который включена лампа, и внутреннему участку, то есть по витку $abcd$, потечет ток. Причем по внешнему участку цепи ток будет протекать в одном направлении, а по внутреннему – витку $abcd$ – ток переменного направления.

Зависимость тока нагрузки от угла поворота витка приведена на рис. 1.9.

В результате взаимодействия тока, протекающего в витке $abcd$, с магнитным полем постоянного магнита (электромагнита) появится электромагнитная сила $F_{эм}$, (см. рис. 1.7), определяемая по закону Ампера:

$$F_{\text{эм}} = BIl,$$

где $F_{\text{эм}}$ – электромагнитная сила, Н; B – магнитная индукция, Тл; l – длина активной части проводника, м; I – величина тока в проводнике, А.

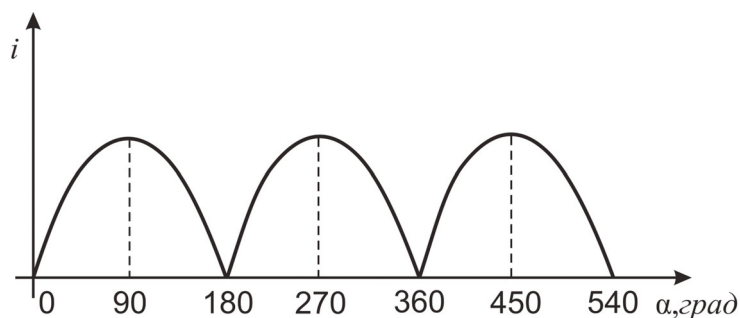


Рис. 1.9. Зависимость $i = f(\alpha)$

Направление действия электромагнитной силы может быть определено по правилу левой руки.

Электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$ создает на витке электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, который направлен навстречу вращающему моменту, то есть является тормозным.

В машинах постоянного тока в магнитном поле вращается не один виток вида $abcd$, а несколько. Причем все они равномерно располагаются по окружности. Соответственно им увеличивается и число коллекторных пластин.

При большом числе витков пульсация выпрямленного тока становится весьма незначительной (рис. 1.10), а электромагнитный момент машины будет равен сумме электромагнитных моментов, создаваемых каждым витком.

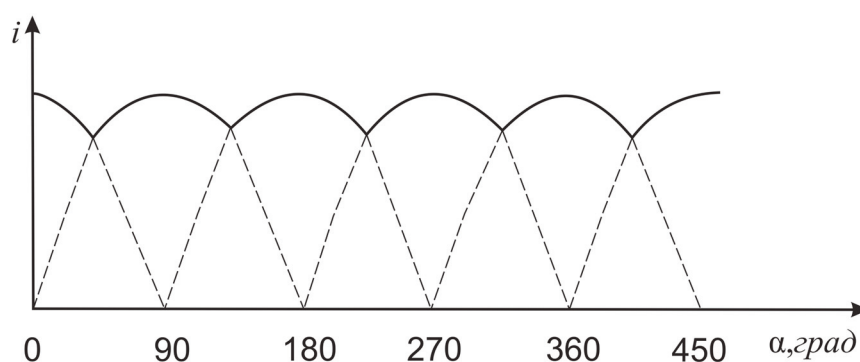


Рис. 1.10. График выпрямленного тока

Суммарный электромагнитный момент генератора тем больше, чем больше будет подключено к генератору потребителей электрической энергии. Для преодоления электромагнитного момента приводной двигатель должен развивать большую мощность.

Принцип действия двигателя

Если к зажимам простейшей машины постоянного тока + Я и - Я подключить вместо потребителей электрической энергии (в данном случае лампы) источник постоянного тока, то по витку *abcd* потечет ток, направление которого показано на рис. 1.7. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{эм} = BIl$, создающие электромагнитный момент $M_{эм}$, под действием которого виток повернется. После поворота витка на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника этого витка из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется и направление тока. Как указывалось выше, таких витков и соответственно коллекторных пластин в машине будет несколько. Следовательно, суммарный электромагнитный момент, равный сумме электромагнитных моментов витков, будет вращать их в определенном направлении и, таким образом, электрическая энергия источника будет преобразовываться в механическую, то есть машина будет работать в качестве электрического двигателя. Коллектор в двигателе превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток в обмотке якоря и работает, таким образом, в качестве механического инвертора тока.

При вращении витков в магнитном поле в их проводниках индуцируется ЭДС, направление которой противоположно направлению тока якоря. Поэтому такая ЭДС в двигателе называется противоэлектродвижущей силой.

Всякое изменение нагрузки на валу двигателя приводит к изменению противо-ЭДС и величины электромагнитного момента.

В 1833 г. Петербургский профессор Э. Х. Ленц, обобщив явление электромагнитной индукции и явление взаимодействия проводника с током и магнитного поля, сформулировал принцип обратимости электрических машин.

Любая электрическая машина в принципе обратима, то есть может работать и в качестве генератора, и в качестве двигателя.

1.4. Понятие об обмотках якоря машин постоянного тока

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины, поскольку при ее непосредственном участии происходит процесс преобразования энергии одного вида в энергию другого вида.

В современных машинах постоянного тока якорная обмотка укладывается в пазах на внешней поверхности якоря. Такие обмотки называются барабанными. Обмотки машин постоянного тока подразделяются на петлевые, волновые и комбинированные. Петлевые и волновые обмотки, в свою очередь, подразделяются на простые и сложные (многоходовые).

Основным элементом каждой обмотки якоря является секция, которая состоит из одного или некоторого числа последовательно соединенных витков и присоединена своими концами к коллекторным пластинам (рис. 1.11).

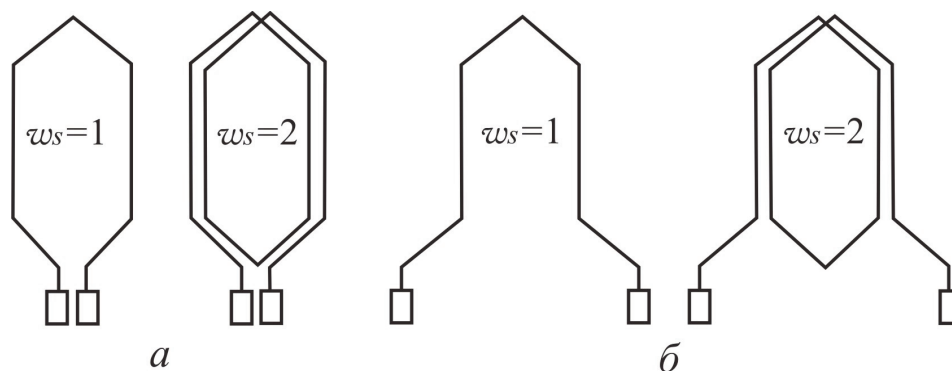


Рис. 1.11. Одновитковая и двухвитковая секции петлевой (а) и волновой (б) обмотки

Секция имеет две активные части длиной l , лежащие в пазах, и две лобовые части (лобовые соединения) на торцевых частях якоря. Активные части обмотки непосредственно участвуют в электрохимическом преобразовании энергии, в то время как лобовые служат только для замыкания цепи тока.

Секции обмоток укладываются в пазы якоря в два слоя. Одна сторона секции – в верхнем слое, другая – в нижнем. Если каждый слой паза содержит по одной стороне секции, то такой паз называется элементарным (рис. 1.12, а). В реальных машинах каждый слой чаще всего состоит не из одной,

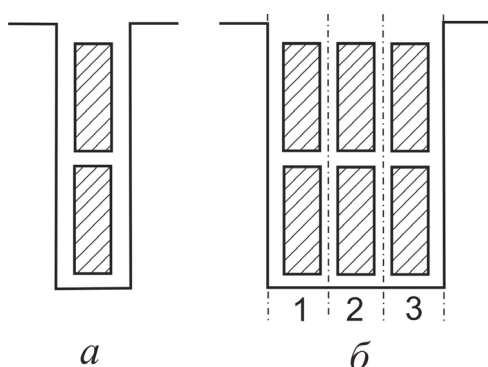


Рис. 1.12. Элементарный (а) и реальный (б) пазы якоря

а из нескольких секционных сторон u_n , т.е. считается, что реальный паз состоит из u_n элементарных пазов, например, на рис. 1.12, б – из трех. Перед укладкой в паз все u_n секции покрывают общей изоляцией, в результате чего образуется катушка якорной обмотки.

Последовательность соединения секций между собой и с коллекторными пластинами задается обмоточными шагами, как показано на рис. 1.13.

На рисунке обозначены:

y_1 – первый частичный шаг обмотки, равный расстоянию между сторонами секции. Этот шаг определяет ширину секции. При этом сторону секции, лежащую в верхней части паза (изображенную сплошной линией),

называют начальной, а сторону, лежащую внизу соответствующего паза (изображенную штриховой линией), – конечной;

y_2 – второй частичный шаг обмотки, равный расстоянию между конечной стороной данной секции и начальной стороной следующей секции, с которой она должна быть соединена;

y – результирующий шаг обмотки, равный расстоянию между началами секций, следующих друг за другом согласно схеме соединения;

y_k – шаг обмотки по коллектору, равный расстоянию между точками подсоединения выводов секции к коллектору.

Шаги обмотки измеряются в элементарных пазах, а шаг по коллектору – в коллекторных делениях. Шаг y_1 выбирается таким образом, чтобы начало и конец секции располагались под полюсами разной полярности, т. е. чтобы ширина секции равнялась полюсному делению τ , выраженному в элементарных пазах (зубцах), приходящихся на один полюс.

Полюсное деление представляет собой часть окружности якоря, приходящаяся на один полюс

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

где D – диаметр якоря, мм; p – число пар полюсов.

При вращении якоря ЭДС, наводимые в сторонах секции, будут иметь противоположные направления, а внутри секции они будут суммироваться. Шаг y_1 , который должен быть равен целому числу, определяется по формуле

$$y_1 = Z_p / (2p) \pm \varepsilon, \quad (1.1)$$

где Z_p – число элементарных пазов; $2p$ – число полюсов; ε – правильная дробь, при которой шаг y_1 равен целому числу.

Чаще всего знак перед ε в формуле (1.1) принимается отрицательным, так как в этом случае уменьшается расход провода на обмотку.

Если $y_1 = Z_p / (2p) \pm \varepsilon = \tau$ является целым числом, то шаг обмотки называется полным или диаметральной. При $y_1 < Z_p / (2p)$ обмотка будет иметь укороченный шаг. Для всех применяемых в машинах постоянного

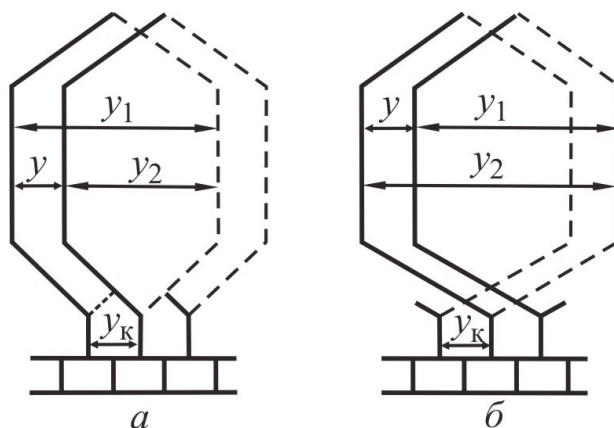


Рис. 1.13. Петлевые обмотки с неперекрывающимися (а) и перекрывающимися (б) секциями

тока обмоток шаг y_1 определяется по (1.1). Величины других шагов зависят от типа обмотки.

Число элементарных пазов Z_ϕ , число секций S и число коллекторных пластин K в машинах постоянного тока связаны между собой определенными соотношениями. Так как каждая секция имеет две стороны, в элементарном пазу также размещаются две секционные стороны и к коллекторной пластине подходят проводники от двух секционных сторон, то

$$Z_\phi = S = K.$$

Поскольку к каждой коллекторной пластине подсоединяются выводы от конца данной секции и начала следующей, можно сказать, что y_k является расстоянием (в коллекторных делениях) между началами следующих одна за другой секций. Тогда можно считать, что $y_k = y$. Для упрощения вычерчивания схемы обмотки обычно принимают все секции одновитковыми ($w_s = 1$).

Простую петлевую обмотку получают последовательным соединением лежащих рядом секций (рис. 1.13). Это соединение можно производить, продвигаясь вправо от исходной секции (см. рис. 1.13, а) или влево (см. рис. 1.13, б). В первом случае $y_2 < y_1$, а во втором случае $y_2 > y_1$. При $y_2 < y_1$ обмотки называются *неперекрещивающимися*, а при $y_2 > y_1$ – *перекрещивающимися*. В электромагнитном отношении эти обмотки равноценны, однако в перекрещивающихся обмотках расход провода несколько больше. Поэтому в машинах постоянного тока применяются *неперекрещивающиеся* петлевые обмотки (см. рис. 1.13, а), для которых справедливы следующие соотношения:

$$y = 1; y_k = 1; y_2 = y_1 - y.$$

Построим схему-развертку для петлевой обмотки при $Z_\phi = 12$ и $2p = 4$ (рис. 1.14). Обмотка будет иметь следующие шаги:

$$y = 1; y_k = 1; y_1 = Z_\phi / (2p) \pm \varepsilon = (12/4) \pm 0 = 3; y_2 = 3 - 1 = 2.$$

Пронумеруем по порядку элементарные пазы (рис. 1.15) и будем считать, что сторона секции, лежащая сверху паза (начало секции), имеет номер паза, а сторона секции, лежащая внизу паза (конец секции), – номер паза со штрихом.

Соединение проводников начнем с первого паза. Начало секции, лежащее сверху этого паза, соединяется с концом секции, лежащим внизу четвертого паза ($1 + 3 = 4$). Конец этой первой секции, лежащий внизу четвертого паза, соединяется с началом следующей секции, лежащей сверху второго паза ($4 - 2 = 2$) и т. д.

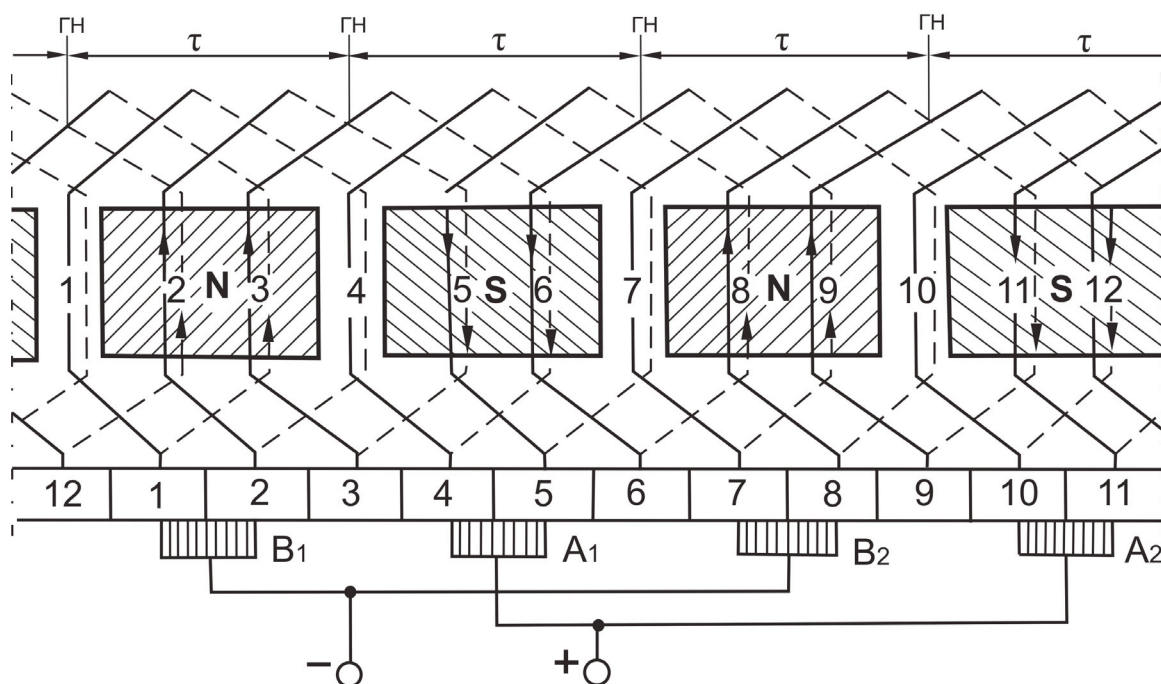


Рис. 1.14. Схема-развертка простой петлевой обмотки
с $Z_s = S = K = 12$ и $2p = 4$

Обмотка якоря соединяется с коллектором. К каждой коллекторной пластине подходят два вывода: от конца одной секции и от начала следующей за ней секции. Условимся коллекторной пластине присваивать номер той секции, с началом которой она соединена.

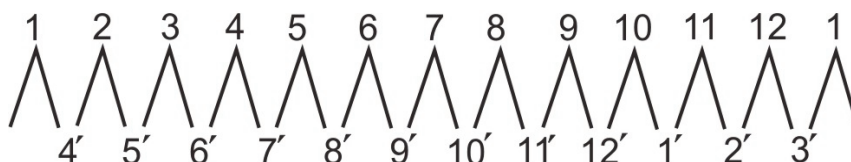


Рис. 1.15. Последовательность соединения проводников
простой петлевой обмотки

Для размещения щеток на коллекторе необходимо знать расположение полюсов. Наметим на рис. 1.14 контуры главных полюсов, для чего произвольно разобьем якорь на $2p$ равных частей (в данном случае на четыре части). Линии раздела между полюсами являются геометрическими нейтральными (ГН), а расстояние между соседними нейтральными равно полюсному делению τ .

Щетки размещают на коллекторе таким образом, чтобы они соприкасались с пластинами, к которым подсоединены секции, расположенные вблизи от геометрических нейтральных. При симметричной форме лобовых частей щетки геометрически оказываются расположенными по оси полю-

сов. Однако и в этом случае говорят, что щетки установлены на геометрической нейтрали, понимая под этим то, что они электрически соединены с секциями, расположенными в нейтрали или вблизи нее. Из рисунка видно, что щетки перекрывают две соседние коллекторные пластины и замыкают накоротко секцию, подсоединенную к ним. Такие секции называются короткозамкнутыми, или коммутируемыми.

При вращении якоря ЭДС, наводимые в проводниках его обмотки, расположенные под соседними полюсами, имеют противоположные направления вследствие разной их полярности. В короткозамкнутых секциях ЭДС наводиться не будет, так как стороны этих секций лежат вблизи нейтралей, где индукция магнитного поля практически равна нулю.

По отношению к выводам машины обмотка якоря оказывается разделенной на несколько параллельных ветвей, схема соединения которых показана на рис. 1.16. Сопоставив эту схему с рис. 1.14, можно обнаружить, что в каждую параллельную ветвь входят секции, начала которых располагаются под одним и тем же полюсом. Следовательно, в общем случае число параллельных ветвей обмотки $2a$ равно числу полюсов $2p$ машины, т.е. $2a = 2p$. Это соотношение является характерной особенностью петлевых обмоток. В рассмотренном примере $2a = 2p = 4$.

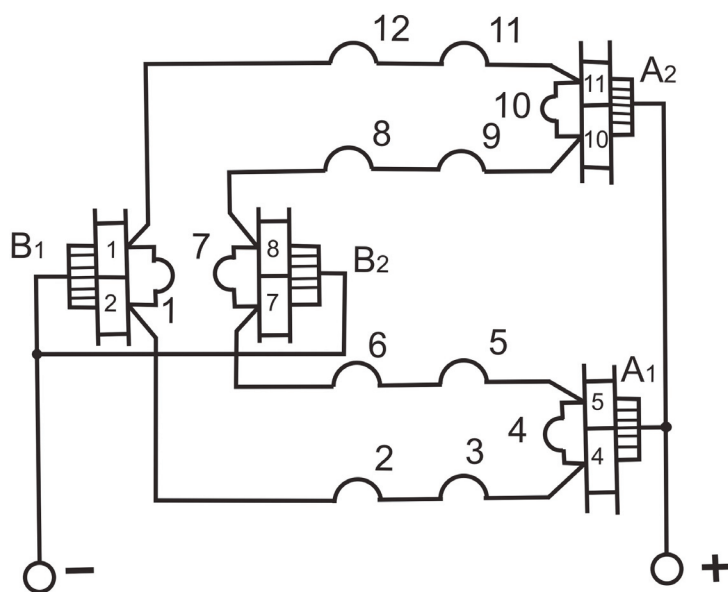


Рис. 1.16. Схема образования параллельных ветвей петлевой обмотки, показанной на рис. 1.14

ЭДС, индуцированные во всех параллельных ветвях петлевой обмотки, теоретически должны быть равны. Практически из-за технологических допусков в величинах воздушного зазора под разными полюсами, дефектов литья в корпусе и других причин магнитные потоки отдельных полюсов несколько различаются между собой, а поэтому в параллельных

ветвях индуцируются неодинаковые ЭДС. Разница между ними составляет 3...5 %, однако вследствие небольшого сопротивления обмотки якоря эта ЭДС оказывается достаточной, для того чтобы по параллельным ветвям, даже при холостом ходе, проходили довольно значительные уравнивающие токи, которые загружают щетки и способствуют возникновению искрения на коллекторе. Чтобы уравнивающие токи замыкались помимо щеток, в петлевых обмотках предусматривают уравнивающие соединения точек обмотки, имеющих теоретически равные потенциалы. Обычно между собой соединяют коллекторные пластины, к которым подключены равнопотенциальные точки обмотки. Практически достаточно иметь одно-два уравнивающих соединения на каждую группу секций, лежащих в одном пазу якоря, т. е. снабжать уравнивателями $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{3}$ коллекторных пластин. Уравнивающие соединения располагают обычно под лобовыми частями обмотки рядом с коллектором. В этом случае они находятся вне магнитного поля главных полюсов и в них ЭДС не индуцируется. Проходящие по уравнивающим соединениям токи, идя по параллельным ветвям обмотки якоря, создают магнитодвижущие силы (МДС), которые уменьшают неравенство магнитных потоков отдельных полюсов.

Сложные петлевые обмотки представляют собой совокупность m простых петлевых обмоток, уложенных в соседних элементарных пазах. Применяются они в случае необходимости увеличения числа параллельных ветвей, число которых $2a = 2pm$. При образовании сложной обмотки производится соединение секций, отстоящих одна от другой на m элементарных пазов. В этом случае $y = y_k = m$, а частичные шаги

$$y_1 = Z_p / (2p) - \varepsilon;$$

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - m.$$

Щетки в случае применения сложной петлевой обмотки выбираются более широкими, чем для простой петлевой обмотки, так как они должны перекрывать не одну, а, как минимум, m коллекторных пластин.

Простую волновую обмотку получают последовательным соединением секций, начала которых лежат под следующими друг за другом одноименными полюсами (рис. 1.17).

При таком соединении результирующий шаг y примерно равен двум полюсным делениям. После p шагов обмотка совершает волнообразный обход якоря. При этом, чтобы при первом же обходе не произошло замыкание обмотки на исходную секцию, ее необходимо подвести к элементарному пазу, расположенному слева или справа от исходного. Тогда $py = Z_p \pm 1$, откуда результирующий шаг волновой обмотки

$$y = (Z_p \pm 1) / p.$$

Если при расчете результирующего шага по этой формуле перед единицей взять знак минус, то после обхода якоря обмотка не дойдет на один паз до исходного (см. рис. 1.17, *а*), а если взять знак плюс, то перейдет на один паз (см. рис. 1.17, *б*). Следовательно, в первом случае обмотка будет неперекрещивающейся, а во втором – перекрещивающейся. Как и в случае использования петлевой обмотки, в машинах постоянного тока применяются неперекрещивающиеся волновые обмотки. Так как при этом число секций равно числу элементарных пазов $S = Z_s$, то результирующий шаг волновой обмотки определяется по формуле

$$y = (Z_s - 1)/p = (S - 1)/p.$$

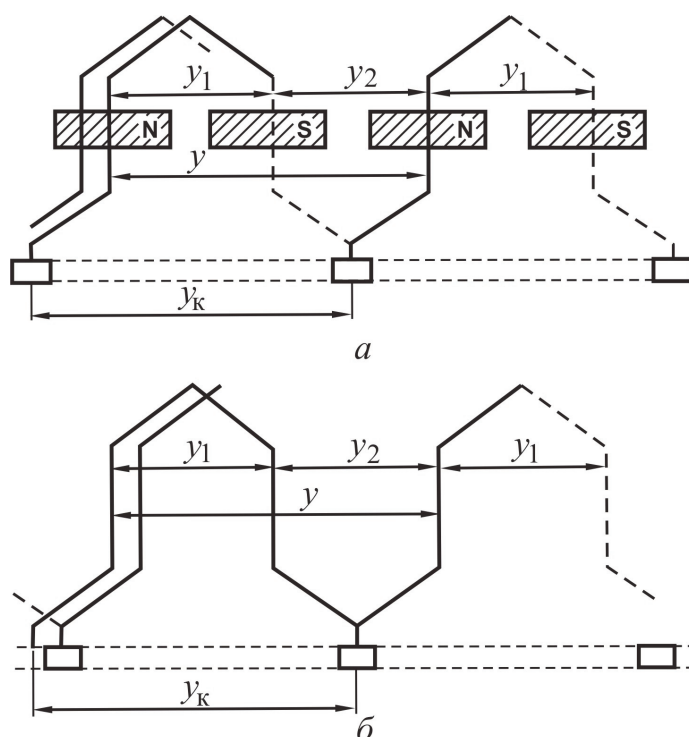


Рис. 1.17. Волновые обмотки с неперекрещивающимися (*а*) и перекрещивающимися (*б*) секциями

В соответствии с рис. 1.17, *а* частичный шаг $y_2 = y - y_1$, а шаг по коллектору $y_k = y$.

На рис. 1.18 показана схема-развертка простой волновой обмотки при $Z_s = 21$ и $2p = 4$. Обмотка будет иметь следующие шаги: $y_1 = 5$; $y = y_k = 10$; $y_2 = 5$. Такая обмотка имеет всего две параллельные ветви, т. е. $2a = 2$. Расстановка щеток на коллекторе производится так же, как и в петлевых обмотках: щетки должны соприкасаться с пластинами, к которым подсоединяются секции, расположенные на нейтрали или вблизи нее.

Характерной особенностью волновых обмоток является независимость числа их параллельных ветвей от числа полюсов машины: при любом числе полюсов число параллельных ветвей волновой обмотки равно двум. На

примере рассматриваемой обмотки можно сказать, что в одну параллельную ветвь волновой обмотки включаются все секции, начала которых располагаются на полюсных делениях одной полярности, а в другую – все секции, начала которых располагаются на полюсных делениях противоположной полярности.

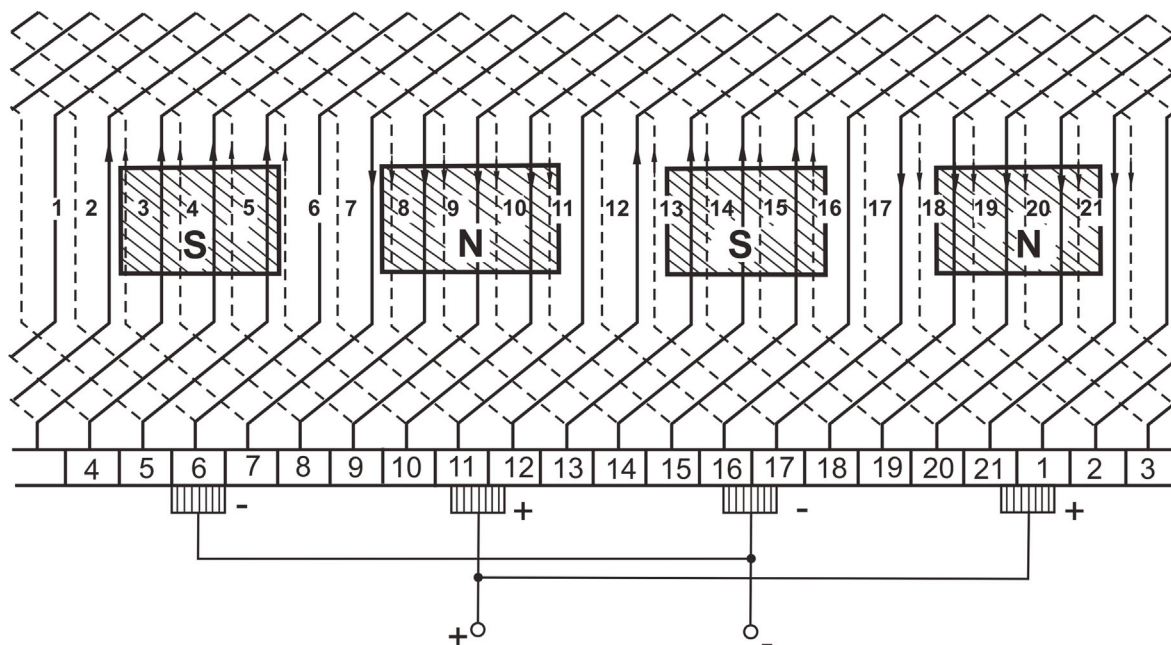


Рис. 1.18. Схема-развертка простой волновой обмотки
с $Z_s = S = K = 21$ и $2p = 4$

Так как волновая обмотка имеет две параллельные ветви, то число щеточных болтов в машине может быть уменьшено до двух. Распределение секций по параллельным ветвям в этом случае практически сохраняется таким же, как и при полном комплекте щеток.

Уравнительные соединения при простой волновой обмотке не требуются, поскольку в каждой параллельной ветви находятся секции, расположенные под всеми полюсами. В результате неравенство потоков отдельных полюсов не вызывает неравенства ЭДС в параллельных ветвях.

Сложные волновые обмотки представляют собой совокупность m простых волновых обмоток, уложенных в соседних элементарных пазах. Применяются они в случае необходимости увеличения числа параллельных ветвей, число которых $2a = 2m$. При выполнении такой обмотки после обхода якоря проводник подводится не к соседнему с начальным элементарному пазу, а к пазу, отстоящему от него на m элементарных пазов. Поскольку $Z_s = S$, то для сложной волновой обмотки справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} py &= Z_s - m; \\ y &= (Z_s - m)/p = (S - m)/p; \end{aligned}$$

$$y_2 = y - y_1;$$

$$y_k = y.$$

Щетки в случае применения сложной волновой обмотки выбираются более широкими, чем для простой волновой обмотки, так как они должны перекрывать не одну, а, как минимум, m коллекторных пластин.

1.5. Магнитная цепь машины постоянного тока

Магнитная система машины постоянного тока состоит из станины (ярма), сердечников главных полюсов с полюсными наконечниками, воздушного зазора и сердечника якоря.

На рис. 1.19 показана картина магнитного поля четырехполюсной машины. При этом имеется в виду машина, работающая в режиме холостого хода (х.х.), когда МДС создается лишь обмоткой возбуждения, а в обмотке якоря и обмотке добавочных полюсов тока нет или он настолько мал, что его влиянием на картину магнитного поля можно пренебречь. В целях упрощения на рис. 1.19 не показаны добавочные полюсы, так как в режиме х.х. их влияние на картину магнитного поля машины незначительно. Из рис. 1.19 видно, что магнитный поток главных полюсов состоит из двух неравных частей: большая часть образует основной магнитный поток Φ , а меньшая – магнитный поток рассеяния полюсов Φ_σ .

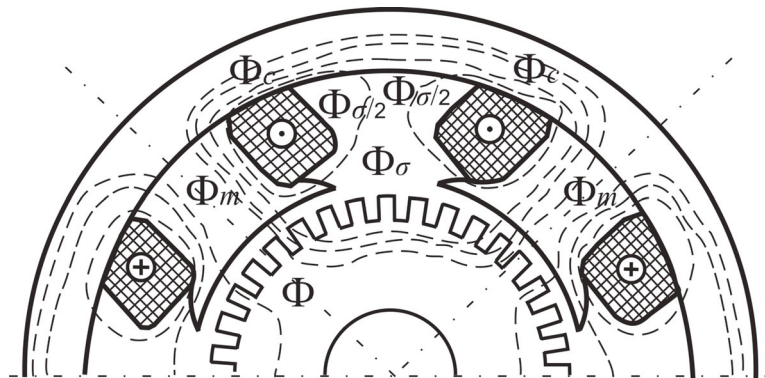


Рис. 1.19. Магнитное поле машины постоянного тока, созданного главными полюсами

Основной магнитный поток Φ , замыкаясь в магнитной цепи, проходит ряд участков (рис. 1.20): воздушный зазор δ , зубцовый слой якоря h_z , спинку якоря L_a , главный полюс h_m , станину (ярмо) L_c .

Расчет магнитных напряжений станины и сердечника главного полюса ведут по магнитному потоку главного полюса Φ_m , который больше основного потока Φ на значение потока рассеяния Φ_δ :

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \sigma_m),$$

где $\sigma_m \approx 10\delta/\tau = 0,10...0,25$ – коэффициент магнитного рассеяния.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме х.х. определяется суммой магнитных напряжений на участках магнитной цепи (см. рис. 1.20):

$$F_B = \Sigma F = 2F_\delta + 2F_z + F_a + 2F_m + F_c, \quad (1.2)$$

где $F_\delta, F_z, F_a, F_m, F_c$ – магнитные напряжения воздушного зазора, зубцового слоя якоря, спинки якоря, главного полюса, станины (ярма) соответственно.

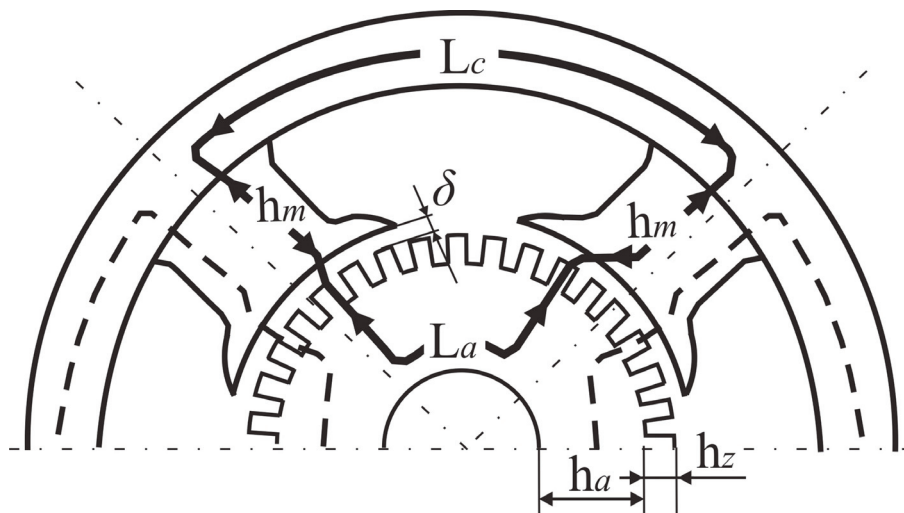


Рис. 1.20. Магнитная цепь машины постоянного тока

Значения магнитных напряжений для различных участков магнитной цепи неодинаковы и зависят от магнитных сопротивлений этих участков. Наибольшим магнитным сопротивлением обладает воздушный зазор, поэтому магнитное напряжение F_δ намного больше любого из слагаемых выражения (1.2).

Другие участки магнитной цепи выполняют из ферромагнитных материалов. В машинах постоянного тока для изготовления различных элементов магнитной цепи применяют следующие материалы.

Сердечник якоря – тонколистовые электротехнические стали марок 2013, 2312 и 2411 толщиной 0,5 мм.

Сердечник главного полюса – листовая анизотропная (холоднокатаная) сталь марки 3411 толщиной 1...2 мм, пластины не изолируют.

Станина – в машинах малой мощности станину изготавливают из стальных цельнотянутых труб, а для машин средней и большой мощности станины делают сварными из листовой конструкционной стали марки Ст3.

1.6. Кривая намагничивания машины постоянного тока

Кривой намагничивания машины называется зависимость $\Phi = f(F_b)$. Она представляет собой характер изменения магнитного потока Φ , проходящего в магнитной цепи машины, от величины магнитодвижущей силы F_b , создаваемой обмоткой возбуждения, или иначе – от величины тока возбуждения I_b , протекающего в обмотке возбуждения, так как $F_b = w_b I_b$, где w_b – число витков обмотки возбуждения (рис. 1.21).

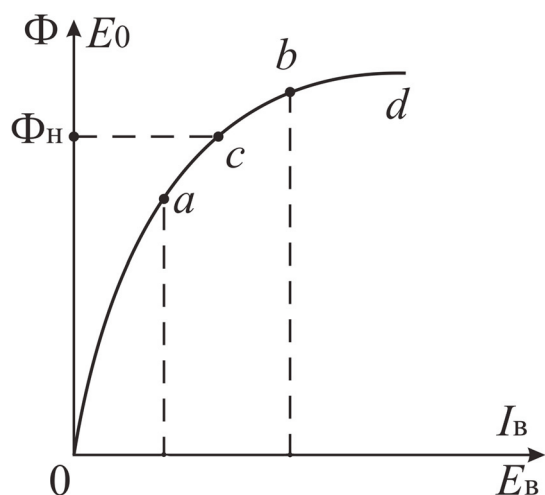


Рис. 1.21. Кривая намагничивания электрической машины

При небольших токах возбуждения, когда магнитный поток мал и сталь магнитной цепи ненасыщена, магнитная проводимость стали во много раз больше проводимости воздушного зазора машины, поэтому МДС обмотки возбуждения F_b в основном расходуется на проведение магнитного потока через воздушный зазор ($F_b \approx F_\delta$). Так как магнитная проницаемость воздуха постоянна, то магнитный поток изменяется практически пропорционально изменению тока возбуждения (участок $0a$, см. рис. 1.21).

По мере увеличения тока возбуждения сталь машины насыщается и проводимость ее снижается. В результате этого МДС, необходимая для проведения магнитного потока по стальным участкам магнитной цепи, возрастет и характеристика $\Phi = f(F_b)$ начинает загибаться вправо. Колено характеристики (участок ab , см. рис. 1.21) соответствует состоянию среднего насыщения стали, при котором обычно и работает машина. При значительном насыщении проводимость стали резко падает и МДС, необходимая для проведения одного и того же магнитного потока по стальным участкам, достигает больших значений. Часть кривой намагничивания, соответствующая насыщенному состоянию стали, изображается практически прямой линией с небольшим наклоном к оси абсцисс (участок bd).

Рабочая точка с электрической машины обычно находится на колене характеристики, что является оптимальным с точки зрения габаритных размеров, массы и использования активных и конструкционных материалов.

На основании закона электромагнитной индукции кривую намагничивания в другом масштабе можно представить зависимостью $E_0 = f(I_b)$, которая называется характеристикой холостого хода электрической машины.

1.7. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока

Пусть на якоре уложено N активных проводников, составляющих обмотку. Очевидно, что $N = 2 w_s S$, где S – число секций, а w_s – число витков в секции. Учитывая, что параллельная ветвь обмотки состоит из $N/2a$ проводников, найдем значение E как арифметическую сумму мгновенных значений ЭДС всех проводников параллельной ветви. При этом будем считать, что секции выполнены с диаметральной шагом $y_1 = \tau$, а щетки установлены по линии геометрической нейтрали (поперечная ось q). В таких условиях ЭДС сторон в каждой секции будут одинаковы, а соответствующие стороны секций (левые или правые) одной параллельной ветви будут находиться под одним полюсом (для петлевых обмоток) или под всеми одноименными полюсами (для волновых обмоток). Кроме того, считаем магнитные полюсы симметричными. При принятых допущениях величина E определяется в результате суммирования ЭДС проводников, расположенных под одним полюсом, а именно:

$$E = \frac{2p}{2a} \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta i} l_{\delta} v_a = \frac{p}{a} l_{\delta} v_a \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta i}, \quad (1.3)$$

где $B_{\delta i}$ – значение магнитной индукции в воздушном зазоре в месте расположения i -го проводника (рис. 1.22).

Расчет ЭДС машины, как видно из (1.3), сводится к определению суммы $\sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta i}$, которую при достаточном большом числе $N/2a$ можно определить через среднее значение магнитной индукции в зазоре под полюсом $B_{\delta \text{ср}}$, как

$$\sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta i} = \frac{N}{2p} B_{\delta \text{ср}}. \quad (1.4)$$

Если величину $B_{\delta \text{ср}}$ определить через основной магнитный поток Φ , как $B_{\delta \text{ср}} = \frac{\Phi}{\tau l_{\delta}}$, и учесть, что окружная скорость якоря $v_a = 2p\tau n$, из (1.4) получим:

$$E = \frac{pN}{a} \Phi n, \quad (1.5)$$

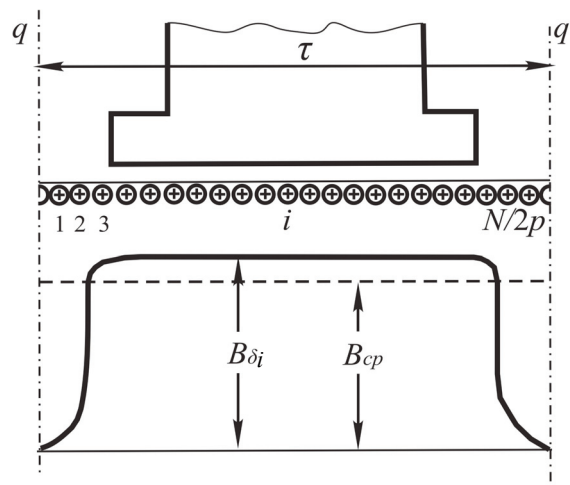


Рис. 1.22. К определению ЭДС машины постоянного тока

или

$$E = c_e \Phi n, \quad (1.6)$$

где $c_e = \frac{pN}{a}$ – коэффициент, определяемый конструктивными данными машины.

Если вместо величины n в (1.5) ввести угловую скорость вращения

$$\omega = 2\pi n,$$

то получим

$$E = c_m \Phi \omega, \quad (1.7)$$

где $c_m = \frac{c_e}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a}$ – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины.

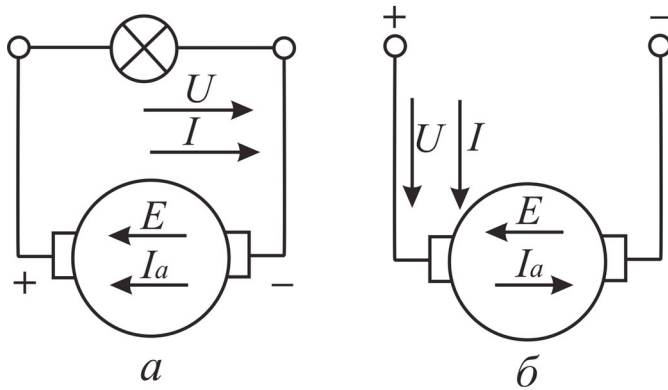


Рис. 1.23. К пояснению направления ЭДС и тока обмотки якоря генератора и двигателя

Из выражений (1.6) и (1.7) следует, что ЭДС E пропорциональна величине основного магнитного потока и частоте вращения якоря.

Под действием ЭДС генератора E в цепи потребителя электрической энергии протекает ток I . Этот ток в обмотке якоря совпадает по направлению с ЭДС E (рис. 1.23, а).

Двигатель, в отличие от генератора, потребляет из сети ток I (см. рис. 1.21, б). Его ве-

личина в общем случае определяется разностью напряжения сети U и индуцированной в обмотке якоря ЭДС E , направленной навстречу напряжению сети. Поэтому ток и ЭДС в обмотке якоря имеют противоположные направления.

Электромагнитный момент $M_{эм}$ определяют в результате суммирования электромагнитных моментов, создаваемых электромагнитными силами $f_{эмi} = B_{\delta i} l_{\delta} i_a$, действующими на i -й проводник обмотки якоря с током i_a . Пологая все проводники расположенными на поверхности якоря и принимая те же допущения, что и при определении ЭДС машины, запишем:

$$M_{эм} = 2p \sum_{i=1}^{N/2p} \frac{D_a}{2} B_{\delta} l_{\delta} i_a.$$

Учитывая, что $D_a = \frac{2p\tau}{\pi}$ и $i_a = \frac{I_a}{2_a}$, получим:

$$M_{\text{эм}} = \frac{p}{2\pi a} \tau l_{\delta} I_a 2p \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta i}.$$

Если выразить сумму в этом выражении через $B_{\text{ср}}$ и Φ , то в окончательной форме получим:

$$M_{\text{эм}} = c_m \Phi I_a. \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) можно представить также в виде

$$M_{\text{эм}} = \frac{1}{2\pi} \left(N \frac{I_a}{2a} \right) \cdot (2p\Phi),$$

откуда следует, что момент пропорционален потоку всех полюсов ($2p\Phi$) и току всех проводников якоря $\left(N \frac{I_a}{2a} \right)$.

Из соотношений (1.7) и (1.8) вытекают также два равноценных выражения для электромагнитной мощности:

$$P_{\text{эм}} = EI_a = M_{\text{эм}} \omega.$$

1.8. Реакция якоря в машине постоянного тока

При холостом ходе машины ($I_a = 0$) магнитное поле создается МДС обмотки возбуждения. Характер распределения этого поля показан на рис. 1.24, а.

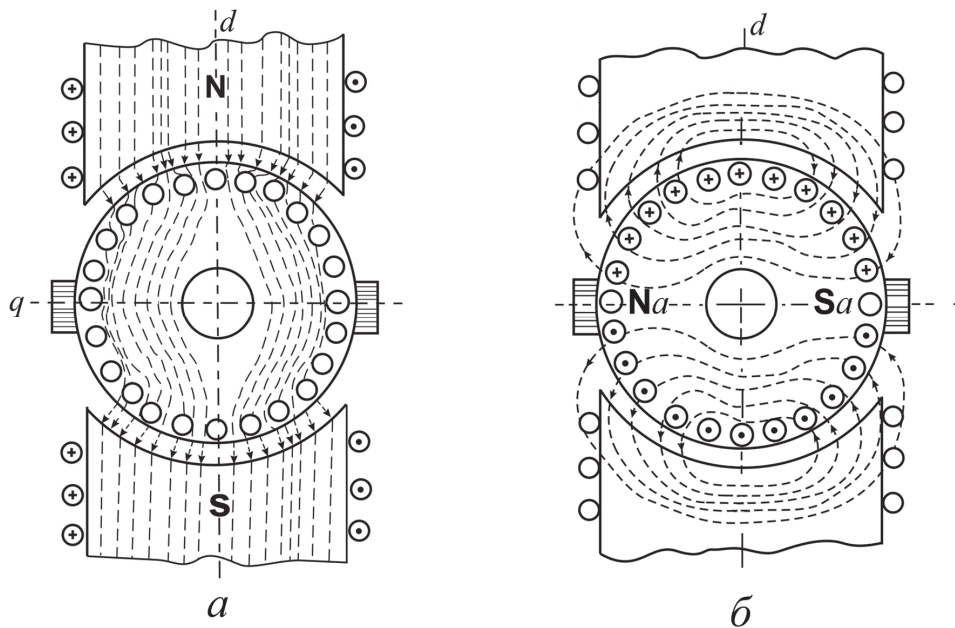


Рис. 1.24. Распределение магнитных полей возбуждения (а) и якоря (б) при установке щеток на геометрической нейтрали

При нагрузке машины по обмотке якоря потечет ток I_a и создаст свое магнитное поле, в результате наложения которого на поле возбуждения образуется результирующий магнитный поток. Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле машины называется **реакцией якоря**.

Характер реакции якоря в машинах постоянного тока зависит от места установки щеток, так как оно определяет распределение тока по проводникам обмотки якоря, а следовательно, и созданного им магнитного поля якоря. При диаметральном шаге обмотки якоря ток в проводниках, лежащих по обе стороны от щетки, имеет разное направление.

Рассмотрим реакцию якоря в случае, когда щетки установлены на геометрической нейтрали (на поперечной оси q). Если по обмотке якоря при отсутствии возбуждения ($I_b = 0$) пропустить ток I_a , то он создаст магнитное поле, примерный характер распределения которого показан на

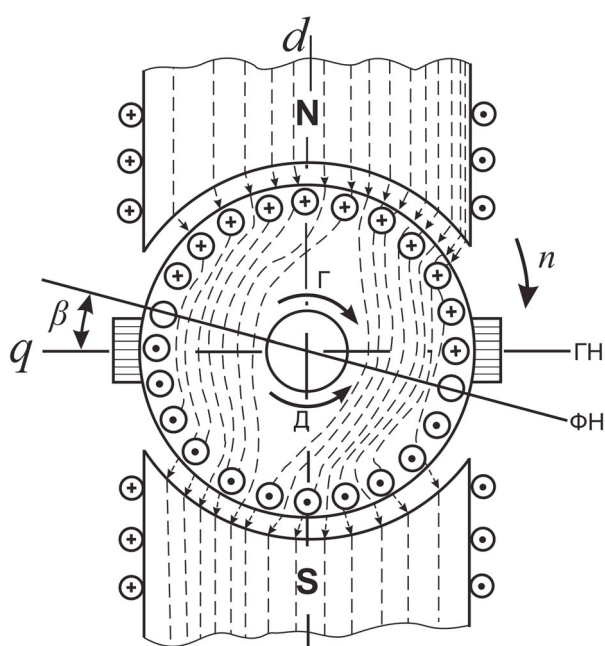


Рис. 1.25. Результирующее магнитное поле машины постоянного тока при нагрузке

рис. 1.24, б. Ось этого поля совпадает с геометрической нейтралью – поперечной осью, поэтому магнитное поле якоря при щетках, расположенных на геометрической нейтрали, называют поперечным полем якоря. Это магнитное поле будет неподвижно в пространстве, так как при любом положении якоря распределение тока по проводникам будет таким, как показано на рисунке.

В общем случае, когда $I_a \neq 0$ и $I_b \neq 0$, поле якоря суммируется с полем возбуждения, образуя результирующее магнитное поле машины. Примерный характер распределения результирующего поля показан на рис. 1.25. По рисунку видно, что воздействие по-

перечного поля якоря искажает магнитное поле машины: под одним краем полюса поле усиливается, а под другим ослабляется. Такую реакцию якоря называют **поперечной**.

Рассматривая полученное результирующее магнитное поле для *генератора*, можно сделать следующие выводы:

- результирующее магнитное поле, в котором вращается якорь, является искаженным, оно не симметрично относительно оси полюсов; степень искажения зависит от величины тока нагрузки;
- магнитный поток в воздушном зазоре машины распределен неравномерно: под набегающими краями полюсов поле якоря ослабляет основное магнитное поле, а под сбегающими – усиливает.

Если магнитная система машины не насыщена (рабочая точка находится на линейном участке $0a$, см. рис. 1.21), то ослабление основного магнитного поля под набегающим краем полюса будет компенсироваться усилением этого поля под сбегающим краем полюса. Величина результирующего магнитного поля машины будет равна величине магнитного поля, создаваемого главными полюсами.

Если магнитная система машины насыщена (рабочая точка по кривой намагничивания смещается на участок ab – см. рис. 1.21), что характерно для реальных режимов работы электрической машины, то в этом случае ослабление основного магнитного поля под набегающим краем полюса не компенсируется усилением этого поля под сбегающим краем ввиду уменьшения его магнитной проницаемости из-за большого насыщения. Результирующий магнитный поток становится меньше основного, что приводит к уменьшению ЭДС обмотки якоря и, следовательно, напряжения на зажимах генератора.

Таким образом, реакция якоря в машине с насыщенной магнитной системой размагничивает машину.

Поперечная реакция якоря вызывает искажение магнитного поля машины относительно оси полюсов (см. рис. 1.25), ведущее к ухудшению коммутации тока якоря, следствием чего является повышенное искрение под щетками, снижающее надежность щеточно-коллекторного узла.

При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а **физическая нейтраль** (ФН) (прямая линия, проходящая через центр якоря и точки на поверхности якоря с магнитной индукцией, равной нулю) смещается относительно геометрической нейтрали на угол β (см. рис. 1.25), чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение результирующего поля, а следовательно, тем больше угол смещения физической нейтрали. Если машина работает на холостом ходу, то физическая нейтраль совпадает с геометрической нейтралью (угол $\beta = 0$).

Для улучшения процесса коммутации тока якоря и, следовательно, уменьшения искрообразования под щетками целесообразно щетки сдвигать в направлении вращения якоря генератора (рис. 1.26).

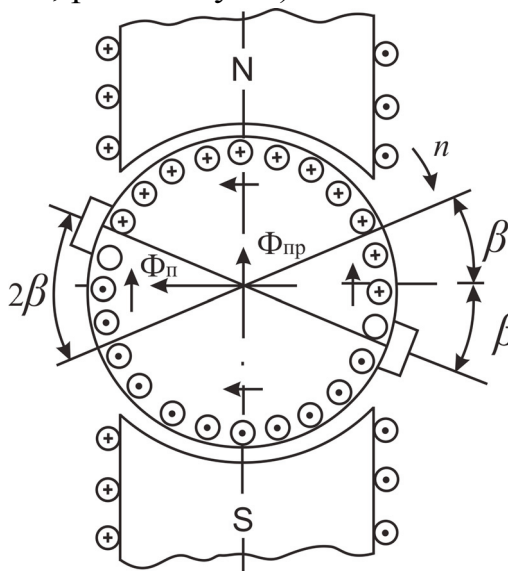


Рис. 1.26. Реакция якоря генератора при установке щеток на физической нейтрали

При установке щеток на физической нейтрали ось магнитного поля якоря поворачивается на угол β . При этом магнитное поле реакции якоря помимо поперечной составляющей $\Phi_{\text{п}}$ приобретает и продольную составляющую $\Phi_{\text{пр}}$, направленную вдоль оси полюсов и навстречу магнитному потоку главных полюсов машины (см. рис. 1.26). Такая реакция якоря называется **продольной размагничивающей**.

Продольная размагничивающая реакция якоря ослабляет основной магнитный поток и, следовательно, ведет к уменьшению ЭДС и напряжения генератора, причем чем меньше насыщена магнитная система, тем влияние реакции якоря проявляется в большей степени.

Поперечная же составляющая реакции якоря, как уже было рассмотрено выше, искажает основное магнитное поле, а при насыщении магнитной системы машины еще и ослабляет его.

Ток в якоре двигателя имеет направление, противоположное направлению тока в якоре генератора, что позволяет сделать следующие выводы относительно реакции якоря в *двигателе*:

- при положении щеток на геометрической нейтрали, поперечная реакция якоря искажает основное магнитное поле, ослабляя его под сбегаящим краем полюса и усиливая под набегающим;

- при сдвиге щеток с геометрической нейтрали, наряду с поперечной, возникает продольная реакция якоря. Сдвиг щеток производится в направлении, противоположном направлению вращения якоря, что улучшает процесс коммутации тока якоря.

Устранение вредного влияния реакции якоря

В связи с тем, что реакция якоря неблагоприятно влияет на рабочие свойства машины постоянного тока, при проектировании машины принимают меры к устранению реакции якоря или хотя бы к ослаблению ее влияния до допустимых пределов.

Компенсационная обмотка в машинах постоянного тока предназначена для компенсации поперечной реакции якоря. При компенсации реакции якоря распределение магнитной индукции в воздушном зазоре под полюсным наконечником машины сохраняет при нагрузке тот же вид, что и при холостом ходе. Вследствие этого напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке не будет увеличиваться, что сделает работу машины более надежной, так как при этом уменьшается опасность возникновения кругового огня. Кроме того, при наличии компенсационной обмотки не будет проявляться размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

Наличие компенсационной обмотки обеспечивает возможность применения минимально возможного воздушного зазора между полюсами и якорем, что обуславливает уменьшение необходимой МДС обмотки возбуждения и ее размеров, а также размеров полюсов, габаритных размеров

и массы машины в целом. Так, в серии машин постоянного тока общего назначения 4П компенсационная обмотка применяется, начиная с машин малой мощности.

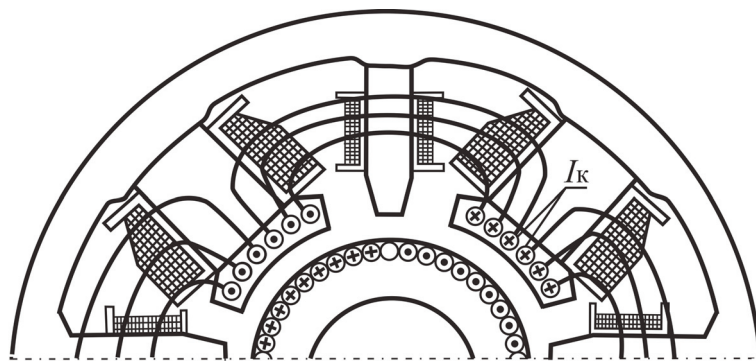


Рис. 1.27. Компенсационная обмотка

Компенсационная обмотка располагается на основных полюсах машины. Для более полной компенсации МДС этих обмоток должны быть направлены навстречу друг другу и иметь одинаковое пространственное распределение под полюсным наконечником. Поэтому компенсационная обмотка, как и обмотка якоря, выполняется распределенной и укладывается в пазы, проштампованные в полюсных наконечниках. Катушки компенсационной обмотки укладываются в пазы полюсных наконечников так, как показано на рис. 1.27, и обтекаются током I_k . Для автоматической компенсации реакции якоря при любых токах I_a компенсационная обмотка включается последовательно с обмоткой якоря.

1.9. Коммутация в машинах постоянного тока

Причины, вызывающие искрообразование под щетками

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины, приходящегося на одну щетку, в соответствии с допустимой плотностью тока для выбранной марки щеток. Если по какой-то причине щетка прилегает к коллектору не всей поверхностью, то возникают чрезмерные местные плотности тока, приводящие к искрению на коллекторе.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, разделяют на механические, потенциальные и электромагнитные.

Механические причины искрения — слабое давление щеток на коллектор, биение коллектора, его эллиптичность или негладкая поверхность, загрязнение поверхности коллектора, выступание миканитовой изоляции над медными пластинами, неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей, а также другие причины, вызывающие нарушение электрического контакта между щеткой и коллектором.

Потенциальные причины искрения появляются при возникновении напряжения между смежными коллекторными пластинами, превышающего допустимое значение. В этом случае искрение наиболее опасно, так как оно обычно сопровождается появлением на коллекторе электрических дуг.

Электромагнитная причина искрения является основной, и связана она с протеканием электромагнитных процессов в коммутируемых секциях.

Иногда искрение вызывается целым комплексом причин. Выяснение причин искрения следует начинать с механических, так как их обнаруживают осмотром коллектора и щеточного устройства. Труднее обнаружить и устранить электромагнитные причины искрения.

Искрение на коллекторе машины оценивается по степени искрения под сбегаящим краем щетки в соответствии с данными, приведенными в табл. 1.1 согласно стандарту.

Таблица 1.1

Оценка степени искрения щеток машин постоянного тока

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
$1\frac{1}{4}$	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки, не вызывающее почернения коллектора	То же
$1\frac{1}{2}$	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

При выпуске готовой машины с завода в ней настраивают темную коммутацию, исключаящую какое-либо искрение. Однако в процессе эксплуатации машины, по мере износа коллектора и щеток, возможно появление искрения. В некоторых случаях оно может быть значительным и опасным, тогда машину необходимо остановить для выяснения и устранения причин искрения. Однако небольшое искрение в машинах общего назначения обычно допустимо.

При вращении якоря машины постоянного тока коллекторные пластины поочередно вступают в соприкосновение со щетками. При этом переход щетки с одной пластины (сбегающей) на другую (набегающую) сопровождается переключением секции обмотки из одной параллельной ветви в другую и изменением как значения, так и направления тока в этой секции. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и сопровождающие его явления называются **коммутацией**.

Секция, в которой происходит коммутация, называется коммутируемой, а продолжительность процесса коммутации – периодом коммутации:

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k} = \frac{60\beta_{щ}}{Kn}.$$

Период коммутации зависит от ширины щетки $b_{щ}$ и окружной скорости коллектора $v_k = \pi D_k n / 60 = K b_k n / 60$, где D_k – диаметр коллектора; n – частота вращения якоря; K – число коллекторных пластин; b_k – ширина коллекторных пластин; $\beta_{щ} = b_{щ} / b_k$ – коэффициент щеточного перекрытия.

При коммутации в секции, замкнутой щеткой, происходит изменение направления тока на противоположное. Так как секция обладает индуктивностью L_s , то в ней будет наводиться ЭДС самоиндукции e_s . В общем случае, когда ширина щетки больше ширины одной коллекторной пластины ($\beta_{щ} > 1$), одновременно коммутируются и рядом лежащие секции, которые могут иметь электромагнитную связь с рассматриваемой секцией. Следовательно, помимо ЭДС самоиндукции в каждой коммутируемой секции наводятся ЭДС взаимной индукции от соседних коммутируемых секций Σe_m . ЭДС коммутируемой секции, равная сумме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции, называется реактивной ЭДС, $e_p = e_s + \Sigma e_m$.

Реактивная ЭДС по правилу Ленца стремится задержать изменение тока в коммутируемой секции, и ее направление совпадает с направлением тока в секции до начала коммутации. Кроме реактивной ЭДС в коммутируемой секции наводится ЭДС вращения $e_{вр}$ от внешнего поля, имеющегося в зоне коммутации. Обычно середина этой зоны совпадает с геометрической нейтралью машины. Внешнее поле создается или поперечным полем якоря, или дополнительными полюсами. В зависимости от направления внешнего поля ЭДС вращения может иметь согласное или встречное направление с реактивной ЭДС.

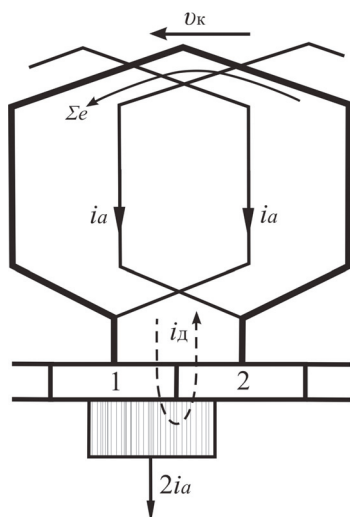


Рис. 1.28. Добавочный ток коммутации i_d в контуре

Таким образом, при работе машины в коммутируемой секции действует результирующая ЭДС

$$\Sigma e = e_p \pm e_{вр}.$$

Результирующая ЭДС создает добавочный ток коммутации i_d , протекающий в контуре, образованном коммутируемой секцией и щеткой (рис. 1.28). Если в момент времени $t = T_k$, когда секция выходит из состояния короткого замыкания, ток i_d не достигает нулевого значения, то происходит механический разрыв этого тока. При этом запасенная в секции энергия, равная $L_s i_d^2 / 2$, высвобождается в виде искрового разряда между щеткой и коллектором. Интенсивность искрения зависит от запасенной в секции электромагнитной энергии.

На процесс коммутации в машинах постоянного тока существенное влияние оказывает переходное сопротивление контакта между щеткой и коллектором. Механизм прохождения тока в этом контакте отличается большой сложностью и зависит от целого ряда факторов. Обычно в соответствии со стандартом для электрических машин задается падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток $\Delta U_{щ}$, которое зависит от их типа. В машинах постоянного тока находят применение графитные, угольно-графитные и электрографитированные щетки, для которых $\Delta U_{щ} = 1,5 \dots 3,0$ В. В электрических машинах низкого напряжения применяются металлографитные щетки с $\Delta U_{щ} = 0,5 \dots 2$ В.

Рассмотрим процесс коммутации на примере простой петлевой обмотки. При этом будем считать, что ширина щетки $b_{щ}$ равна ширине коллекторной пластины b_k , что переходное сопротивление $r_{щ}$ между щеткой и коллектором является постоянным и не зависящим от плотности тока в щетке $J_{щ}$, т. е. зависимость $\Delta U_{щ} = f(J_{щ})$ считается линейной. При заданном направлении вращения якоря (рис. 1.29) коммутация секции начнется с того момента, когда коллекторная пластина 2 войдет в соприкосновение с правым краем щетки, который называют набегающим. С этого момента секция будет замкнута щеткой накоротко и в ней будет происходить изменение тока i_{kc} (от $+i_a$ до $-i_a$). При дальнейшем перемещении якоря через период коммутации T_k коллекторная пластина 1 выйдет из соприкосновения со щеткой под ее левым краем (сбегающим). В этот момент коммутация секции закончится, секция перейдет в другую параллельную ветвь обмотки

и ток в ней поменяет направление на противоположное по сравнению с его направлением до начала коммутации.

Для определения закона изменения тока в коммутируемой секции в момент времени $t (0 < t < T_k)$ по рис. 1.29 и второму правилу Кирхгофа можно записать

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = \Sigma e, \quad (1.9)$$

где $r_{щ1}$, $i_2 r_{щ2}$ – переходные сопротивления щеточного контакта сбегущей и набегущей частей щетки соответственно.

В уравнении (1.9) не учитываются сопротивления коммутируемой секции и выводов, соединяющих эту секцию с коллектором, так как эти сопротивления значительно меньше переходных сопротивлений в щеточном контакте.

По первому правилу Кирхгофа для коммутируемой секции справедливо выражения

$$i_1 = i_a + i_{кс}; \quad i_2 = i_a + i_{кс}. \quad (1.10)$$

Из совместного решения уравнений (1.9) и (1.10) получим

$$i_{кс} = i_a(r_{щ1} - r_{щ2})/(r_{щ1} + r_{щ2}) + \Sigma e/r_{щ}, \quad (1.11)$$

где $r_{щ} = r_{щ1} + r_{щ2}$ – переходное сопротивление щеточного контакта.

Переходные сопротивления $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ обратно пропорциональны площадям $S_{щ1}$ и $S_{щ2}$ соприкосновения щетки с соответствующей коллекторной пластиной, которые определяются по формулам

$$S_{щ1} = b_{щ1} l_{щ} = v_k (T_k - t) l_{щ}; \quad (1.12)$$

$$S_{щ2} = b_{щ2} l_{щ} = v_k t l_{щ},$$

где $l_{щ}$ – осевая длина щетки.

Тогда

$$r_{щ1}/r_{щ2} = S_{щ1}/S_{щ2} = t/(T_k - t).$$

Подставив (1.12) в (1.11), получим в окончательном виде выражение для тока в коммутируемой секции:

$$i_{кс} = i_a(1 - 2t/T_k) + \Sigma e/r_{щ}. \quad (1.13)$$

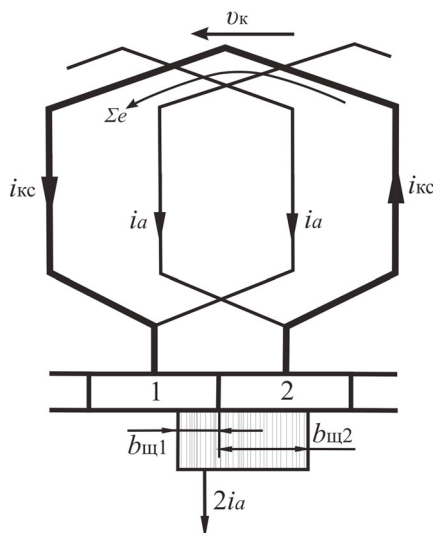


Рис. 1.29. Расчетная схема для вывода закона изменения тока в коммутируемой секции

Из уравнения (1.13) видно, что характер изменения тока $i_{\text{кс}}$ за период коммутации зависит от значения суммарной ЭДС и ее знака. В зависимости от этого различают три вида коммутации.

Прямолинейная коммутация в машинах постоянного тока имеет место при $\sum e = 0$, для чего реактивная ЭДС e_p в любой момент времени должна быть скомпенсирована ЭДС вращения $e_{\text{вр}}$. При выполнении этого условия ток в коммутируемой секции

$$i_{\text{кс}} = i_{\text{пр}} = i_a(1 - 2t/T_k), \quad (1.14)$$

где $i_{\text{пр}}$ – ток, соответствующий прямолинейной коммутации.

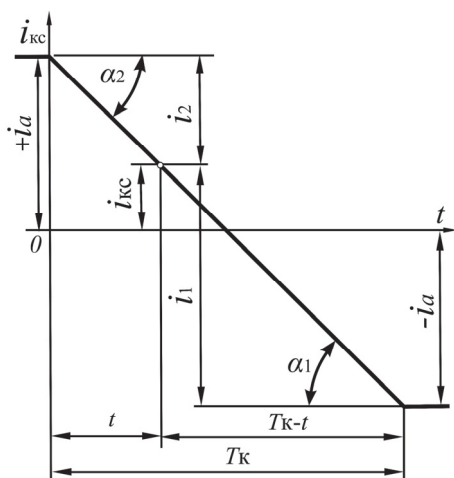


Рис. 1.30. Изменение тока в коммутируемой секции при прямолинейной коммутации

Из формулы (1.14) видно, что изменение тока во времени происходит по линейному закону (рис. 1.30), поэтому такая коммутация и называется прямолинейной ($\alpha_1 = \alpha_2$).

Замедленная коммутация происходит в том случае, когда реактивная ЭДС e_p имеет большее значение, чем компенсирующая ее ЭДС вращения $e_{\text{вр}}$, а также тогда, когда $e_{\text{вр}}$ совпадает по направлению с e_p . В соответствии с (1.13) ток $i_{\text{кс}}$ при замедленной коммутации можно представить в виде двух составляющих:

$$i_{\text{кс}} = i_{\text{пр}} + i_{\text{д}}. \quad (1.15)$$

Замедленная коммутация обычно наблюдается в машинах постоянного тока без дополнительных полюсов со щетками, установленными на геометрической нейтрали, а также в машинах, имеющих слабые (недостаточные для компенсации ЭДС e_p) дополнительные полюсы ($\alpha_1 > \alpha_2$).

Добавочный ток $i_{\text{д}} = \sum e/r_{\text{щ}}$ стремится задержать изменение тока в коммутируемой секции, т. е. ток в секции изменяется медленнее и проходит через нулевое значение позже, чем при прямолинейной коммутации (рис. 1.31), поэтому такая коммутация и называется замедленной. При замедленной коммутации добавочный ток $i_{\text{д}}$ замыкается поперек щетки, причем в скользящем контакте под сбегающей ее частью он имеет такое же направление, как и ток i_a , а под набегающей частью – встречное этому току. Следовательно, плотность тока под сбегающим краем щетки будет больше, чем под набегающим.

Для замедленной коммутации характерно искрение сбегающего края щетки. Такое искрение возникает, когда при завершении коммутации секции в момент времени $t = T_k$ ток $i_{\text{д}}$ не успевает достигнуть нулевого значе-

ния и при размыкании секции происходит его разрыв (рис. 1.32). Этот ток называется током разрыва $i_{\text{раз}}$. Чем больше ток разрыва, тем сильнее искрение под сбегающим краем щетки.

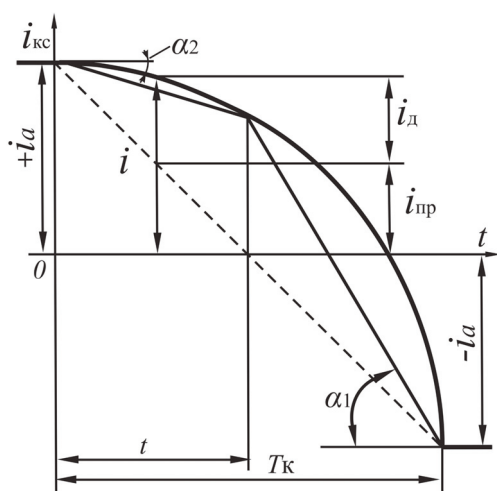


Рис. 1.31. Изменение тока в коммутационной секции при замедленной коммутации

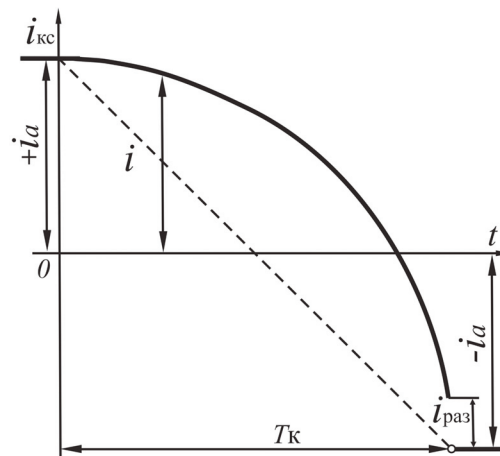


Рис. 1.32. Возникновение тока разрыва при замедленной коммутации

Ускоренная коммутация имеет место, если $\Sigma e = (e_p - e_{\text{вр}}) < 0$, то наблюдается в машинах постоянного тока при сильных дополнительных полюсах. При ускоренной коммутации появившийся добавочный ток i_d имеет противоположное направление по сравнению с током при замедленной коммутации. Следовательно, ток $i_{\text{кс}}$ будет изменяться быстрее, чем при прямолинейной коммутации (рис. 1.33), а плотность тока под набегающей частью щетки будет больше, чем под сбегающей ($\alpha_2 > \alpha_1$).

При сильном ускорении коммутации также возможно появление тока разрыва $i_{\text{раз}}$ и искрения под щетками, т. е. сильно ускоренная коммутация является недопустимой. Однако небольшое ускорение коммутации, при которой ток $i_{\text{кс}}$ достигает значения, близкого к току параллельной ветви i_a до завершения коммутации, является желательным. В этом случае ток сбегающей части щетки i_1 еще до завершения коммутации будет равен нулю, что уменьшает вероятность появления искрения. Во многих случаях ускоренная коммутация в машинах постоянного тока более предпочтительна, чем прямолинейная.

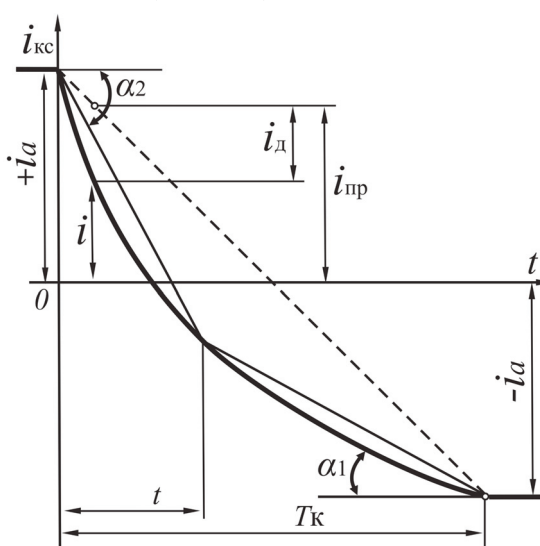


Рис. 1.33. Изменение тока в коммутационной секции при ускоренной коммутации

Способы улучшения коммутации

Так как искрение щеток связано с разрывом добавочного тока коммутируемой секции, то меры по улучшению коммутации направлены, в первую очередь, на уменьшение его значения. Как следует из уравнений (1.13) и (1.15), добавочный ток

$$i_d \approx \Sigma e / r_{щ} = (e_p \pm e_{вр}) / r_{щ}.$$

Следовательно уменьшить добавочный ток i_d можно увеличением сопротивления $r_{щ}$, или уменьшением результирующей ЭДС Σe , наводимой в коммутируемой секции.

Сопротивление цепи коммутируемой секции состоит из сопротивления самой секции, сопротивления выводов секции, соединяющих ее с коллектором, и переходного сопротивления щеточного контакта. Сопротивления секции и выводов малы по сравнению с $r_{щ}$, а их увеличение приведет к росту электрических потерь и снижению КПД.

В машинах постоянного тока сопротивление щеточного контакта увеличивают за счет применения графитовых щеток марок ЭГ, Г и других, значение $\Delta U_{щ}$ которых находится в пределах 1,7...2,7 В. Чем тяжелее условия коммутации, тем целесообразнее выбирать щетки с большим значением $\Delta U_{щ}$. Подбор щеток обычно производится на заводе-изготовителе при настройке коммутации. Таким образом, улучшить коммутацию можно **путем увеличения сопротивления коммутируемой секции.**

Улучшение коммутации путем уменьшения реактивной ЭДС. Этот метод в основном относится к машинам, не имеющим дополнительных полюсов. Значение реактивной ЭДС может быть получено по формуле Пихельмайера

$$e_p = 2w_s l_\delta A v_a \xi, \quad (1.16)$$

где w_s – число витков в секции; l_δ – расчетная длина якоря; A – линейная нагрузка якоря; v_a – окружная скорость якоря; ξ – удельная магнитная проводимость для потоков рассеяния коммутируемых секций.

Из формулы (1.16) видно, что уменьшить реактивную ЭДС можно путем уменьшения входящих в нее величин. При проектировании машин постоянного тока стремятся увеличить число секций обмотки якоря, чтобы уменьшить число витков в каждой из них (обычно в машинах средней и большой мощностей $w_s = 1$) и уменьшить длину якоря за счет увеличения его диаметра. С повышением мощности машины для уменьшения реактивной ЭДС снижают номинальную частоту вращения (окружную скорость якоря v_a). Уменьшать линейную нагрузку A якоря для снижения e_p в большинстве случаев нецелесообразно, так как при этом увеличиваются размеры машины.

Уменьшение результирующей удельной магнитной проводимости достигается путем использования менее глубоких, но более широких открытых пазов на якоре (т.е. путем уменьшения проводимости пазового рассеяния), а также обмоток с укороченным шагом y_1 . (При этом часть статоров коммутлируемых секций, которые при диаметральном шаге располагались бы в одном пазу, перемещается в соседние пазы, вследствие чего ЭДС взаимной индукции Σe_m уменьшается).

Уменьшение e_p может быть достигнуто применением более широких щеток (увеличением $\beta_{щ}$). При этом увеличивается период коммутации секции, уменьшается скорость изменения тока в ней (di_{kc}/dt) и ЭДС самоиндукции e_s . Несмотря на то, что в этом случае возрастает число секций, индуктивно связанных с коммутлируемой секцией, реактивная ЭДС уменьшается.

Практикой установлено, что для удовлетворительной коммутации среднее значение $\Sigma e = (e_p + e_{вр})$ в секции не должно превышать 0,5...0,7 В.

Улучшение коммутации путем создания коммутлирующего поля в зоне коммутации. Наиболее целесообразно улучшать коммутацию посредством компенсации реактивной ЭДС. Для этого в зоне, где располагаются проводники коммутлируемых секций, необходимо создать магнитное поле, которое будет наводить ЭДС вращения, имеющую направление, противоположное направлению реактивной ЭДС, и равную или несколько превышающую ее. Такое магнитное поле и наводимую им ЭДС e_k называют соответственно коммутлирующим полем и коммутлирующей ЭДС. Разность $e_p - e_k = 0$ соответствует прямолинейной коммутации в машине, а при $e_p - e_k < 0$ коммутация будет носить ускоренный характер. Для того чтобы получить оптимальную ускоренную коммутацию, следует увеличить ЭДС e_k , т. е. принять ее равной $(1,1...1,15)e_p$. Получить коммутлирующее поле можно двумя способами: с помощью дополнительных полюсов и сдвигом щеток с геометрической нейтрали.

1. Создание коммутлирующего поля с помощью дополнительных полюсов — это основной способ улучшения коммутации в машинах постоянного тока. В настоящее время дополнительные полюсы применяются во всех машинах мощностью от 1 кВт.

Дополнительные полюсы располагаются между основными полюсами по поперечной оси машины (геометрической нейтрали), как показано на рис. 1.34. Щетки у машин с дополнительными полюсами также устанавливаются на гео-

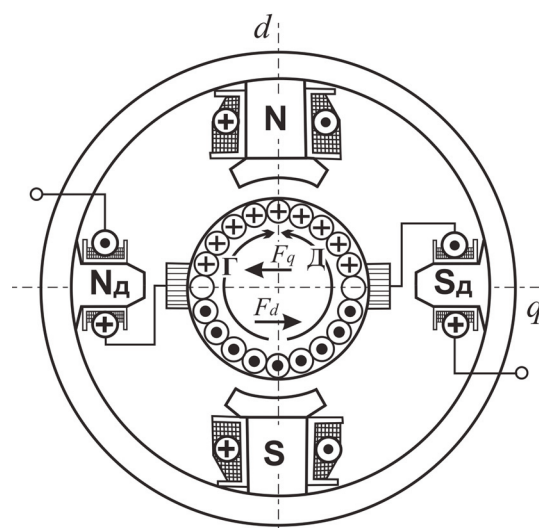


Рис. 1.34. Расположение дополнительных полюсов

метрической нейтрали. Число дополнительных полюсов обычно равно числу главных полюсов. Сердечники этих полюсов обычно собирают из отдельных листов электротехнической стали.

Магнитное поле дополнительного полюса создается катушкой, расположенной на его сердечнике. Катушки полюсов соединяются между собой, образуя обмотку возбуждения дополнительных полюсов. Полюсы должны иметь чередующуюся полярность, согласованную с полярностью главных полюсов. Полярность каждого из дополнительных полюсов выбирается таким образом, чтобы наводимая его полем ЭДС e_k была направлена навстречу реактивной ЭДС. Если машина работает в режиме генератора, дополнительный полюс должен иметь полярность следующего за ним (по направлению вращения якоря) главного полюса. В двигательном режиме полярность дополнительного полюса соответствует полярности предшествующего ему (по направлению вращения якоря) главного полюса. Магнитный поток дополнительных полюсов Φ_d имеет встречное направление по отношению к магнитному потоку якоря в зоне коммутации Φ_q .

Для того чтобы компенсация реактивной ЭДС происходила при любых значениях тока якоря, необходимо, чтобы магнитный поток дополнительного полюса и коммутирующая ЭДС изменялись так же, как реактивная ЭДС, т. е. пропорционально этому току. Поэтому обмотка дополнительных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря. Кроме того, магнитная цепь дополнительных полюсов должна быть ненасыщена, так как только при этом условии индукция коммутирующего поля B_k и, следовательно, ЭДС e_k будут пропорциональны току якоря. Поэтому воздушный зазор под дополнительными полюсами должен быть больше зазора под главными полюсами. Это уменьшает пульсацию магнитного потока под полюсом из-за зубчатого строения якоря, что также благоприятно сказывается на коммутации.

2. Создание коммутирующего поля путем сдвига щеток с геометрической нейтрали для получения коммутирующего поля применяется в машинах, не имеющих дополнительных полюсов. Щетки сдвигаются с нейтрали таким образом, чтобы коммутируемые секции располагались за физической нейтралью, т. е. в зоне, где имеется поле главных полюсов. Щетки следует сдвигать с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря в генераторах и против направления вращения – в двигателях.

1.10. Потери и коэффициент полезного действия машин постоянного тока

При работе электрической машины часть потребляемой ею энергии теряется бесполезно и рассеивается в виде тепла. Мощность потерянной энергии называют потерями мощности или просто потерями.

В машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, имеют место магнитные, электрические и механические потери (составляющие группу основных потерь) и добавочные потери.

Магнитные потери P_m происходят только в сердечнике якоря, так как только этот элемент магнитопровода машины постоянного тока подвергается перемагничиванию. Величина магнитных потерь, состоящих из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов, зависит от частоты перемагничивания $f = pn/60$, значений магнитной индукции в зубцах и спинке якоря, толщины листов электротехнической стали, ее магнитных свойств и качества изоляции этих листов в пакете якоря.

Электрические потери в коллекторной машине постоянного тока обусловлены нагревом обмоток и щеточного контакта. Потери в цепи возбуждения определяются потерями в обмотке возбуждения и в реостате, включенном в цепь возбуждения:

$$P_{эв} = U_{эв} I_{эв}.$$

Здесь $U_{эв}$ – напряжение на зажимах цепи возбуждения. Потери в обмотках цепи якоря

$$P_{эа} = I_a^2 \Sigma r,$$

где сопротивление обмоток в цепи якоря Σr , зависящее от температуры.

Электрические потери также имеют место и в контакте щеток:

$$P_{эщ} = \Delta U_{щ} I_a.$$

Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины, поэтому эти потери называют переменными.

Механические потери. В машине постоянного тока механические потери складываются из потерь от трения щеток о коллектор

$$P_k = k_{тр} S_{щ} f_{щ} v_k,$$

трения в подшипниках $P_{п}$ и на вентиляцию $P_{вен}$

$$P_{мех} = P_k + P_{п} + P_{вен},$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения щеток о коллектор ($k_{тр} = 0,2 \dots 0,3$); $f_{щ}$ – удельное давление, Н/м², щетки (для машин общего назначения $f_{щ} = (2 \dots 3) \cdot 10^4$ Н/м²).

Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения ($n = \text{const}$) можно считать постоянными.

Сумма магнитных и механических потерь составляет потери х.х.:

$$P_0 = P_m + P_{мех}.$$

В машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь – **добавочных**. Эти потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнивательных соединениях, в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией основного потока из-за наличия зубцов якоря, и др. Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету величину. Поэтому, согласно стандарту, в машинах без компенсационной обмотки значение добавочных потерь P_d принимают равным 1 % от полезной мощности для генераторов или 1 % от подводимой мощности для двигателей. В машинах с компенсационной обмоткой значение добавочных потерь принимают равным соответственно

Коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия электрической машины представляет собой отношение мощностей отдаваемой (полезной) P_2 к подводимой (потребляемой) P_1 :

$$\eta = P_2/P_1.$$

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь

$$\Sigma P = P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{эв}} + P_{\text{эа}} + P_{\text{эщ}} + P_d,$$

можно подсчитать КПД машины по одной из следующих формул:

– для генератора

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P};$$

– для двигателя

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}.$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75...0,90 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,90...0,97 для машин мощностью свыше 100 кВт. Намного меньше КПД машин постоянного тока малой мощности. Например, для машин мощностью от 5 до 50 Вт $\eta = 0,15...0,50$. Указанные значения КПД соответствуют номинальной нагрузке машины.

Характеристика КПД $\eta = f(P_2)$ быстро растет с увеличением нагрузки в начальной части. КПД достигает наибольшей величины при нагрузке, близкой к номинальной, и при больших нагрузках уменьшается под влиянием увеличения электрических и добавочных потерь (рис. 1.35).

Коэффициент полезного действия электрической машины можно определять: а) методом непосредственной нагрузки по результатам измерений подводимой P_1 и отдаваемой P_2 мощностей; б) косвенным методом по результатам измерений потерь.

Метод непосредственной нагрузки применим только для машин малой мощности, для остальных случаев применяется косвенный метод, как более точный и удобный. Установлено, что при $\eta > 80\%$ измерять КПД методом непосредственной нагрузки нецелесообразно, так как он дает большую ошибку, чем косвенный метод.

Существует несколько косвенных способов определения КПД. Наиболее прост способ холостого хода двигателя, когда потребляемая машиной постоянного тока мощность затрачивается только на потери х.х. Что же касается электрических потерь, то их определяют расчетным путем после предварительного измерения электрических сопротивлений обмоток и приведения их к рабочей температуре.

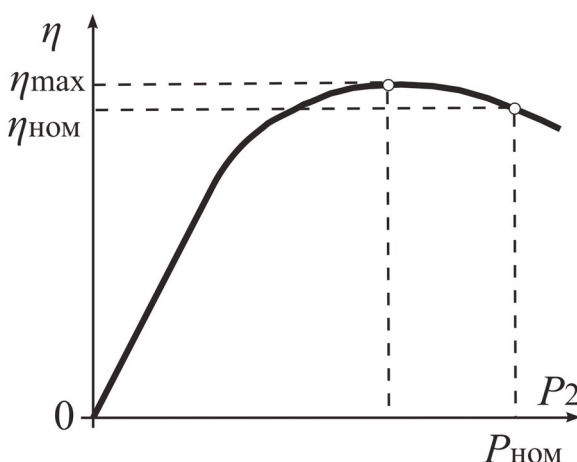


Рис. 1.35. Зависимость $\eta = f(P_2)$

2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Классификация и основные уравнения генераторов

По способу возбуждения генераторы постоянного тока подразделяют на **генераторы независимого возбуждения** и **генераторы с самовозбуждением**.

Независимое возбуждение может быть электромагнитным или магнитоэлектрическим.

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения генераторы с самовозбуждением бывают параллельного возбуждения, последовательного возбуждения и смешанного возбуждения.

На рис. 2.1 изображена принципиальная схема генератора с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения, расположенная на главных полюсах, подключается к независимому источнику питания (независимое электромагнитное возбуждение). Ток в цепи возбуждения I_B изменяют в широ-

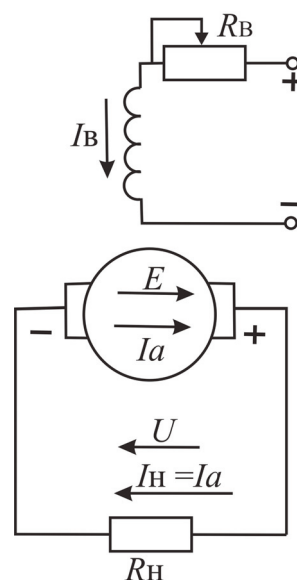


Рис. 2.1. Принципиальная схема генератора независимого возбуждения

ких пределах с помощью регулировочного реостата R_B . Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, невелика и в номинальном режиме составляет 1...5 % номинальной мощности генератора.

В генераторах с магнитоэлектрическим возбуждением для создания поля используются постоянные магниты, устанавливаемые на его полюсах. Это генераторы относительно небольшой мощности, основным недостатком которых является трудность регулирования напряжения.

На рис. 2.2, *а* изображена принципиальная схема генератора параллельного возбуждения. Обмотка возбуждения получает питание от обмотки якоря. На схеме видно, что ток возбуждения I_B зависит от напряжения на зажимах якоря, а ток якоря $I_a = I_H + I_B$. Обычно ток I_B не превышает 2...3 % значения номинального тока генератора.

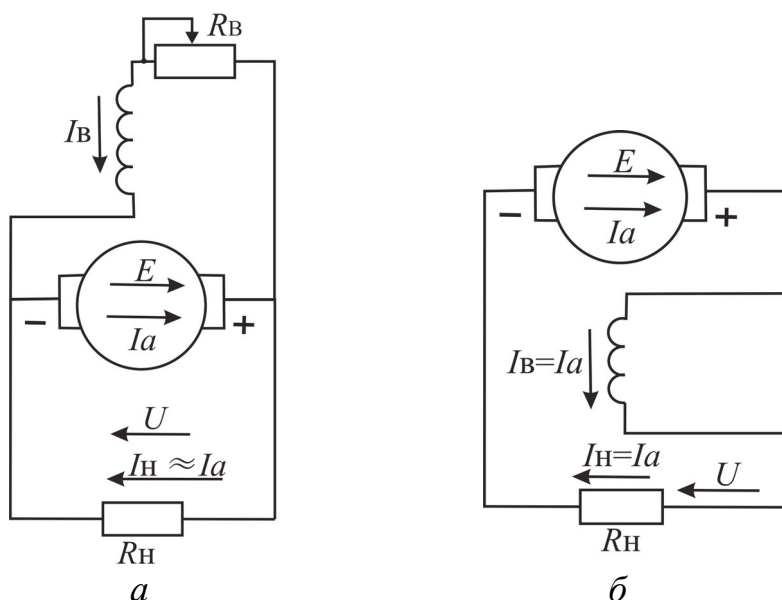


Рис. 2.2. Принципиальные схемы генераторов параллельного (*а*) и последовательного (*б*) возбуждения

В генераторах последовательного возбуждения (рис. 2.2, *б*) обмотка возбуждения соединяется последовательно с обмоткой якоря и ее ток возбуждения равен току якоря и току нагрузки: $I_B = I_a = I_H$. Генераторы последовательного возбуждения имеют крайне ограниченное применение.

В генераторах со смешанным возбуждением (рис. 2.3) на полюсах размещаются две обмотки возбуждения. Одна из этих обмоток, имеющая большее количество витков и выполненная из проводников относительно небольшого сечения, включается параллельно с обмоткой якоря, а другая обмотка с малым числом витков из проводников большего сечения – последовательно с ней. При этом параллельная и последовательная обмотки могут включаться как согласовано, так и встречно, в зависимости от чего различают генераторы смешанного согласного возбуждения и генераторы

смешанного встречного возбуждения. Обычно в генераторах смешанного возбуждения основная часть МДС возбуждения создается параллельной обмоткой.

Основные уравнения генераторов

Уравнение равновесия напряжений для цепи якоря генератора имеет вид

$$U = E - I_a \Sigma r_a - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (2.1)$$

где U и E – напряжение и ЭДС генератора; I_a – ток якоря; Σr_a – суммарное сопротивление всех обмоток, обтекаемых током якоря; $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в щеточном контакте (на пару щеток).

Падение напряжения в цепи якоря складывается из падения напряжения в обмотках $I_a \Sigma r_a$ падения напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}}$.

В общем случае

$$\Sigma r_a = r_a + r_d + r_c + r_k, \quad (2.2)$$

где r_a , r_d , r_c , r_k – сопротивления обмотки якоря, дополнительных полюсов, последовательной (сериесной) и компенсационной соответственно.

В зависимости от конкретной схемы генератора часть сопротивлений в правой части формулы (2.2) может отсутствовать. Для приближенных расчетов уравнение (2.1) можно упростить за счет пренебрежения падением напряжения в щеточном контакте. Тогда уравнение примет вид:

$$U = E - I_a \Sigma r_a. \quad (2.3)$$

При упрощенном учете переходного сопротивления щеточного контакта принимают $r_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} / I_H = \text{const}$, и тогда можно записать

$$U = E - I_a \Sigma R_a, \quad (2.4)$$

где $\Sigma R_a = \Sigma r_a + r_{\text{щ}}$.

Уравнение равновесия напряжений для цепи с обмоткой независимого возбуждения

$$U_B = I_B \Sigma r_B,$$

где $\Sigma r_B = r_B + R_B$; r_B – сопротивление обмотки возбуждения; R_B – сопротивление регулировочного реостата.

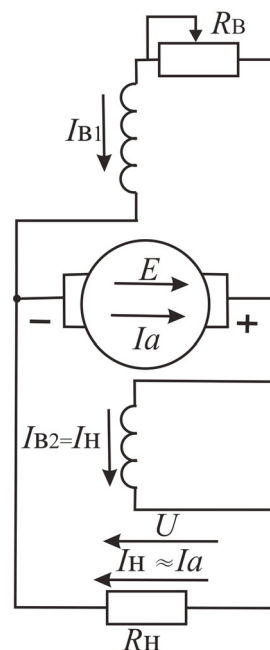


Рис. 2.3. Принципиальная схема генератора смешанного возбуждения

Для генераторов параллельного и смешанного возбуждения справедливо уравнение

$$U = I_B \Sigma r_B.$$

Уравнение баланса токов для генераторов параллельного и смешанного возбуждения

$$I_a = I_B + I_H.$$

2.2. Основные характеристики генераторов постоянного тока

Рабочие свойства электрических машин определяются их характеристиками. Для генераторов постоянного тока основными являются характеристики холостого хода, нагрузочная, внешняя и регулировочная.

Характеристики генераторов определяются при постоянной номинальной частоте вращения якоря и могут быть получены как экспериментальным, так и расчетным путем.

1. **Характеристика холостого хода** (рис. 2.4) представляет собой зависимость ЭДС на зажимах генератора постоянного тока от тока возбуждения $E = f(I_B)$, при отключенной внешней цепи, когда ток нагрузки $I_H = 0$.

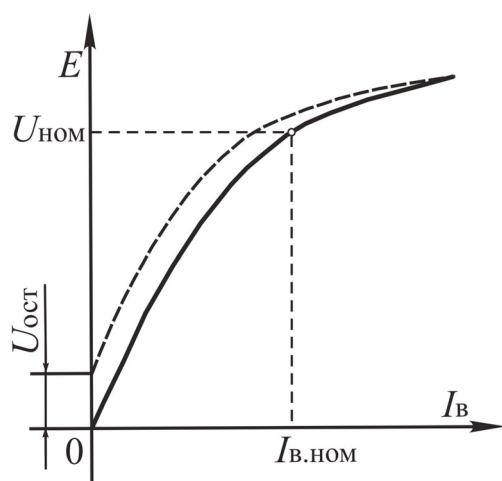


Рис. 2.4. Характеристика холостого хода

При токе возбуждения, равном нулю, в обмотке якоря индуцируется остаточная ЭДС $E_{ост}$, вызванная остаточной индукцией и составляющая 2...4 % от номинального напряжения генератора. Для практических целей используется сплошная линия характеристики, штриховой линией на рис. 2.4 показана опытная характеристика. Положение на характеристике точки, соответствующей номинальному напряжению, определяет степень насыщения магнитной цепи. Обычно эта точка лежит в верхней части изгиба характеристики холостого хода, так как работа на прямолинейной части

не обеспечивает устойчивого напряжения, а работа на насыщенной части характеристики ограничивает возможность регулирования напряжения.

2. **Нагрузочная характеристика** представляет собой зависимость напряжения генератора постоянного тока от тока возбуждения $U = f(I_B)$ при неизменном токе якоря $I_a = \text{const}$. Практическое значение этой характеристики заключается в возможности определения по ней размагничивающего действия реакции якоря и зависимости реакции якоря от насыщения магнитной цепи и тока якоря.

Как правило, нагрузочную характеристику генератора постоянного тока строят совместно с характеристикой холостого хода.

Нагрузочная характеристика 2 (рис. 2.5) для генератора с независимым возбуждением расположена ниже характеристики холостого хода 1 вследствие падения напряжения в цепи якоря, согласно (2.3), и размагничивающего действия поперечной реакции якоря, приводящего к уменьшению потока возбуждения и ЭДС обмотки якоря.

Нагрузочная характеристика генератора с параллельным возбуждением из-за малости тока возбуждения по сравнению с током якоря ($I_a \approx I_H$) практически не отличается от характеристики генератора с независимым возбуждением.

Нагрузочная характеристика генератора со смешанным согласным возбуждением может располагаться как выше характеристики холостого хода (при сильной последовательной обмотке возбуждения, МДС которой компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря), так и ниже нее (при слабой последовательной обмотке возбуждения).

3. Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения генератора постоянного тока от тока нагрузки $U = f(I_H)$ при постоянном токе возбуждения $I_B = \text{const}$ (для генератора с независимым возбуждением) или постоянном сопротивлении цепи обмотки возбуждения $\Sigma r_B = \text{const}$ (для генераторов с самовозбуждением).

Рассмотрим внешнюю характеристику при уменьшении нагрузки. Исходной в этом случае является точка характеристики, в которой номинальному току нагрузки $I_{H, \text{ном}}$ соответствует номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ (рис. 2.6). Ток возбуж-

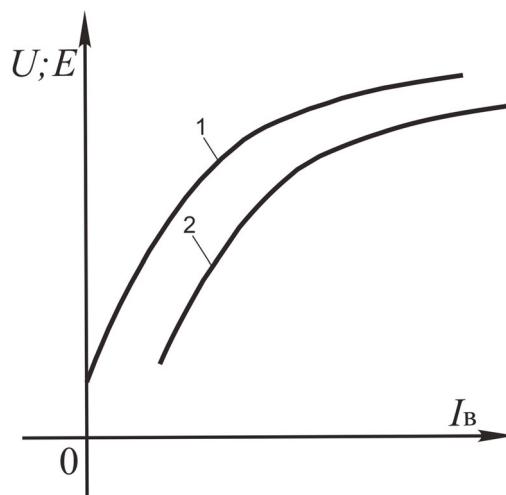


Рис. 2.5. Характеристика холостого хода (1) и нагрузочная характеристика (2) генератора с независимым возбуждением

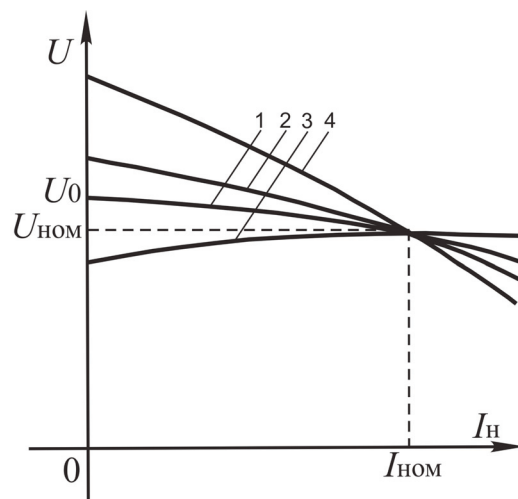


Рис. 2.6. Внешние характеристики генераторов с независимым (1), параллельным (2), смешанным согласным (3) и смешанным встречным (4) возбуждением

дения, соответствующий работе генератора в этой точке внешней характеристики, называется номинальным током возбуждения $I_{в.ном}$.

В процессе снятия внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (кривая 1) ток $I_{в.ном}$ поддерживается постоянным. Начиная от исходной точки, ток нагрузки I_n постепенно уменьшают до нуля. Напряжение генератора при этом в соответствии с (2.3) увеличивается, так как уменьшаются падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря. При холостом ходе в этом случае $U = U_0 = E$.

По внешней характеристике определяют изменение напряжения

$$\Delta U = (U_0 - U_{ном})/U_{ном}.$$

В генераторах с независимым возбуждением $\Delta U = 10...15\%$, а ток короткого замыкания $I_{кз}$ составляет $(5...10)I_{ном}$, увеличиваясь с ростом номинальной мощности.

Внешнюю характеристику генератора с параллельным возбуждением (кривая 2) снимают при условии, что $\Sigma r_b = \text{const}$. С уменьшением тока нагрузки I_n напряжение U возрастает более сильно, чем в генераторах с независимым возбуждением, так как с ростом напряжения увеличиваются ток возбуждения I_b и ЭДС обмотки якоря, чего не происходит в случае независимого возбуждения.

Рассмотрим часть внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением при токах нагрузки больше номинального. С уменьшением сопротивления нагрузки ток I_n сначала увеличивается до определен-

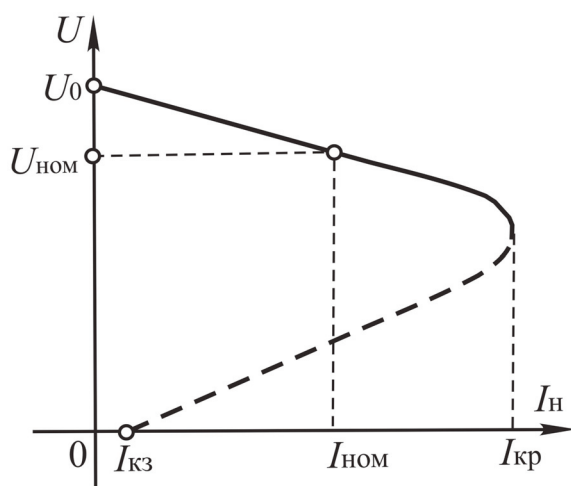


Рис. 2.7. Внешняя характеристика генератора постоянного тока с параллельным возбуждением

ного значения $(1,5...2,5)I_{ном}$, называемого критическим $I_{кр}$ (рис. 2.7), а затем начинает уменьшаться. Такой вид внешней характеристики объясняется тем, что при уменьшении напряжения уменьшается и ток возбуждения. Причем сначала этот процесс протекает медленно, так как сталь машины насыщена и уменьшение тока возбуждения не вызывает сильного снижения магнитного потока и ЭДС машины. Затем, когда ток возбуждения начинает соответствовать линейной (ненасыщенной) части характеристики холостого хода, размагничивание

происходит более интенсивно. При коротком замыкании ($U = 0$) машина будет практически размагничена и установившийся ток короткого замыкания $I_{кз}$ будет определяться только остаточной ЭДС, $I_{кз} = E_{ост}/\Sigma r_a$.

Изменение напряжения ΔU в генераторах с параллельным возбуждением составляет 15...20 %.

В генераторах смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения наибольшая доля МДС возбуждения создается параллельной обмоткой, а последовательная обмотка рассчитывается так, чтобы несколько перекомпенсировать размагничивающее действие реакции якоря. В этом случае последовательная обмотка не только компенсирует размагничивающую составляющую реакции якоря, но и создает избыточную МДС, которая будет увеличивать магнитный поток возбуждения и ЭДС якоря при увеличении тока нагрузки. В результате внешняя характеристика генератора будет располагаться ниже характеристик генератора с параллельным и независимым возбуждением (кривая 3 на рис. 2.6).

Эффективность действия последовательной обмотки возбуждения зависит от насыщения магнитной цепи машины. Так как МДС последовательной обмотки при сильном насыщении будет давать небольшое увеличение магнитного потока, то даже при достаточно сильной обмотке или больших нагрузках напряжение на выводах машины будет уменьшаться с ростом тока нагрузки.

В генераторах смешанного возбуждения со встречным включением обмоток возбуждения МДС последовательной обмотки возбуждения будет размагничивать машину, действуя согласно с размагничивающей составляющей реакции якоря. Однако при уменьшении тока нагрузки их совместное размагничивающее действие будет уменьшаться, что приведет к большему по сравнению с генераторами параллельного возбуждения росту напряжения. В результате внешняя характеристика рассматриваемого генератора будет иметь резко возрастающий характер (кривая 4 на рис. 2.6).

4. Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения генератора от его тока нагрузки $I_b = f(I_n)$ при неизменном напряжении $U = U_{ном}$. Обычно ее снимают при увеличении нагрузки (первая точка характеристики соответствует режиму холостого хода, т.е. при $I_n = 0$).

В генераторах с независимым возбуждением при увеличении тока нагрузки I_n ток возбуждения I_b также необходимо увеличить, чтобы компенсировать уменьшение напряжения из-за падения напряжения и размагничивающего действия реакции якоря, как показано на рис. 2.8 (кривая 1).

Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением будет совпадать с характеристикой генератора с независимым возбуждением (кривая 1 на рис. 2.8), поскольку условие $U = \text{const}$ превращает параллельное возбуждение (по схеме включения обмотки возбуждения) в независимое ($U_b = U = \text{const}$).

В генераторах со смешанным согласным возбуждением в соответствии с их внешней характеристикой (кривая 3 на рис. 2.6) при увеличении

тока нагрузки ток возбуждения сначала необходимо уменьшать. И только после достижения номинального значения тока, когда напряжение генератора при работе на внешней характеристике начнет уменьшаться, ток возбуждения следует увеличивать (кривая 2 на рис. 2.8).

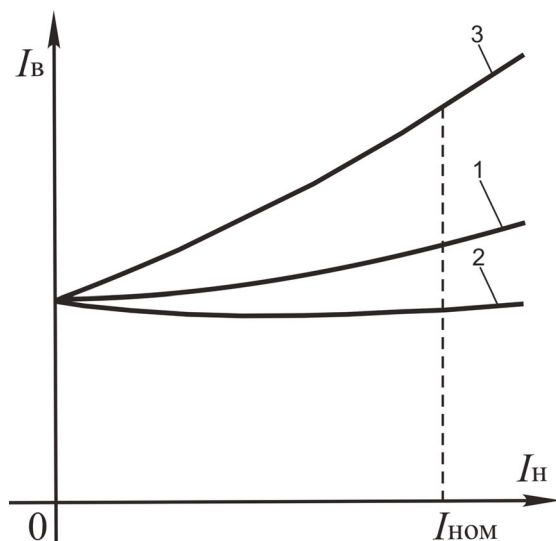


Рис. 2.8. Регулировочные характеристики генераторов с независимым (1), смешанным согласным (2) и смешанным встречным (3) возбуждением

В генераторах со смешанным встречным возбуждением из-за их сильного размагничивания с ростом тока нагрузки для поддержания напряжения необходимо резко увеличивать ток возбуждения, как показано на рис. 2.8 (кривая 3).

Таким образом, наибольшее изменение напряжения при изменении тока нагрузки характерно для генераторов смешанного возбуждения при встречном включении обмоток возбуждения, а наименьшее – для генераторов смешанного возбуждения при согласном включении обмоток (см. рис. 2.6).

Генераторы со смешанным согласным и параллельным возбуждением применяются в преобразовательных установках в качестве автономных источников постоянного тока.

Использование генераторов со смешанным согласным возбуждением предпочтительно в тех случаях, когда происходит частое и резкое изменение нагрузки, так как в них возможно обеспечение автоматического поддержания напряжения.

Генераторы с независимым возбуждением применяются тогда, когда требуется менять в широких пределах напряжение источника постоянного тока. В частности, они находят применение в электроприводах для питания двигателей постоянного тока с широким диапазоном регулирования частоты вращения.

2.3. Самовозбуждение генераторов постоянного тока

В генераторах параллельного возбуждения обмотка возбуждения питается от обмотки якоря (см. рис. 2.2, а), поэтому при вращении ротора ЭДС в обмотке якоря наводиться не будет. Для появления ЭДС необходимо наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$ в машине, для чего она хотя бы один раз должна быть намагничена путем пропускания тока через обмотку возбуждения от постороннего источника.

Процесс самовозбуждения генератора протекает следующим образом. Остаточный магнитный поток наводит в обмотке вращающегося якоря остаточную ЭДС $E_{\text{ост}}$, которая составляет 1...3 % номинального напряжения машины. Так как обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря, то $E_{\text{ост}}$ создает в ней небольшой ток возбуждения, который, в свою очередь, создает начальный поток возбуждения. В зависимости от направления этого потока возможны два варианта развития процесса самовозбуждения:

1. Поток возбуждения направлен встречно остаточному потоку; результирующий поток уменьшается и машина не возбуждается. В этом случае надо поменять местами выводы обмотки параллельного возбуждения.

2. Поток возбуждения направлен согласно с остаточным потоком. При этом результирующий поток увеличивается, что приводит к увеличению ЭДС. Увеличение ЭДС вызывает увеличение тока возбуждения, результирующего потока и т.д.

Процесс нарастания тока возбуждения при холостом ходе машины ($I_{\text{н}} = 0$) описывается уравнением

$$e = i_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}} + d(L_{\text{в}} i_{\text{в}})/dt, \quad (2.5)$$

где $L_{\text{в}}$ – индуктивность обмотки возбуждения.

Падение напряжения в цепи якоря от тока $I_{\text{в}}$ весьма мало, поэтому в уравнении (2.5) напряжение возбуждения принято равным ЭДС обмотки якоря. Процесс самовозбуждения завершится, когда ток в обмотке возбуждения достигнет установившегося значения. Тогда

$$\begin{aligned} d(L_{\text{в}} i_{\text{в}})/dt &= 0; \\ E &= I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

На рис. 2.9 показаны зависимости $E = f(I_{\text{в}})$ и $i_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}} = f(I_{\text{в}})$ при $n = \text{const}$. Первая зависимость является характеристикой холостого хода (кривая 1), а вторая – характеристикой цепи возбуждения (прямые 2 – 4).

Если принять, что $\Sigma r_{\text{в}} = \text{const}$, то характеристика цепи возбуждения будет представлять собой прямую линию 2, идущую под углом α к оси абсцисс, причем $\text{tg} \alpha = E/I_{\text{в}} = \Sigma r_{\text{в}}$. Точка пересечения А характеристик 1 и 2 отвечает равенствам (2.6), а соответствующая этой точке ЭДС обмотки якоря

устанавливается при данном сопротивлении цепи возбуждения $\Sigma r_{\text{в}}$. При изменении сопротивления цепи возбуждения будет изменяться ЭДС обмотки якоря. Если увеличивать сопротивление $\Sigma r_{\text{в}}$, то угол α наклона характеристики цепи возбуждения будет возрастать, а точка А будет перемещаться влево.

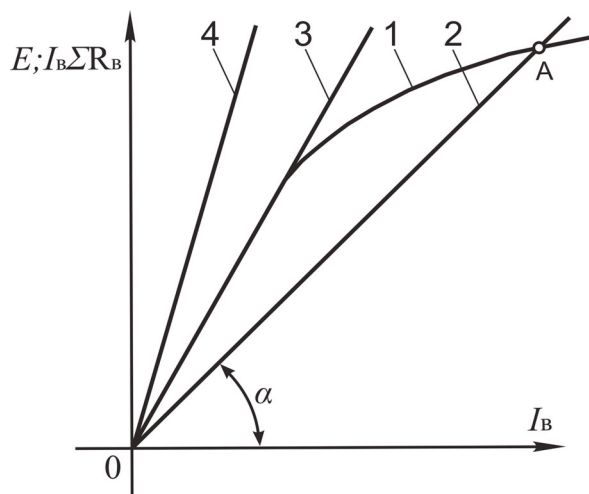


Рис. 2.9. Характеристики холостого хода (1) и цепи возбуждения (2 – 4) при постоянной частоте вращения

При некотором критическом сопротивлении цепи возбуждения $\Sigma r_{\text{в.кр}}$ прямая 3, определяемая произведением $I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в.кр}}$, совпадает с прямолинейной частью характеристики холостого хода. Критическое сопротивление является максимальным сопротивлением цепи обмотки возбуждения, при котором возможно самовозбуждение машины.

При дальнейшем увеличении сопротивления $\Sigma r_{\text{в}}$ самовозбуждение происходить не будет, так как прямая 4, соответствующая $i_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в}} = f(I_{\text{в}})$, в этом случае не пересекает характеристику холостого хода.

Если генератор работает с переменной частотой вращения, то каждому значению n будет соответствовать своя характеристика холостого хода, так как ЭДС E пропорциональна n . Следовательно, для каждой частоты вращения будет свое значение критического сопротивления $I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в.кр}}$, а для каждого сопротивления $I_{\text{в}} \Sigma r_{\text{в.кр}}$ — своя критическая частота вращения $n_{\text{кр}}$, ниже которой невозможно самовозбуждение генератора.

Таким образом, для самовозбуждения генератора необходимо выполнение следующих условий:

- в машине должен существовать остаточный магнитный поток;
- поток возбуждения должен быть направлен согласно с остаточным потоком;
- сопротивление цепи обмотки возбуждения должно быть меньше критического или частота вращения якоря должна быть больше критической.

3. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Классификация и основные уравнения двигателей

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках, где требуется широкое и плавное регулирование скорости вращения (прокатные станы, мощные металлорежущие станки, электрическая тяга на транспорте и т. д.).

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Принципиальные схемы двигателей постоянного тока аналогичны схемам соответствующих генераторов (см. рис. 2.1, 2.2 и 2.3). Отличие заключается в том, что ток якоря I_a в двигателях независимого и последовательного возбуждения равен сетевому току I , а в двигателях параллельного и смешанного возбуждения из сети потребляется и ток возбуждения I_b .

Основные уравнения двигателей

Уравнение равновесия напряжений для цепи якоря в режиме двигателя имеет вид

$$U = E + I_a \Sigma R_a. \quad (3.1)$$

Здесь ΣR_a – суммарное сопротивление цепи якоря как для генераторов (см. выражение (2.4)).

В режиме двигателя всегда $U > E$.

Из равенства (3.1) следует, что

$$I_a = \frac{U - E}{\Sigma R_a}, \quad (3.2)$$

где согласно выражению (1.6)

$$E = c_e \Phi n. \quad (3.3)$$

Уравнение частоты вращения двигателя можно получить из совместного решения уравнений (3.1) и (3.3)

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi}. \quad (3.4)$$

Уравнения равновесия напряжений для цепи возбуждения не отличаются от аналогичных уравнений для генераторов.

Уравнение баланса токов для двигателей параллельного и смешанного возбуждения

$$I = I_a + I_b.$$

Уравнения движения

$$J = \frac{d\omega}{dt} = M_{эм} - M_c,$$

где J – момент инерции якоря двигателя и вращающихся частей приводимого механизма; $M_{эм}$ – электромагнитный момент, развиваемый двигате-

лем в соответствии с (1.8): $M_{\text{эм}} = c_m \Phi I_a$; M_c – момент сопротивления, равный сумме моментов приводного механизма M_2 и тормозного момента M_0 , обусловленного потерями внутри самого двигателя.

3.2. Основные характеристики двигателей постоянного тока

Основными характеристиками, по которым оценивают рабочие свойства двигателей, являются:

- **скоростная** – зависимость частоты вращения от тока якоря, $n = f(I_a)$;
- **механическая** – зависимость частоты вращения от электромагнитного момента $n = f(M_{\text{эм}})$.
- **моментная** – зависимость электромагнитного момента от тока якоря, $M_{\text{эм}} = f(I_a)$.

Двигатели независимого и параллельного возбуждения. Все характеристики этих двигателей получают при постоянных значениях напряжения сети и тока возбуждения, обычно соответствуют своим номинальным значениям: $U = U_{\text{ном}}$; $I_b = I_{b.\text{ном}}$.

С точки зрения характеристик двигателя независимого и параллельного возбуждения эквивалентны.

1. Скоростная характеристика $n = f(I_a)$. Выражением, определяющим эту характеристику, является уравнение (3.4).

Если щетки находятся на геометрической нейтрали, при увеличении I_a поток Φ несколько уменьшится вследствие действия поперечной реакции якоря. В результате этого частота вращения n , согласно выражению (3.4), будет стремиться возрасти. С другой стороны, падение напряжения $\Sigma I_a R_a$ вызывает уменьшение частоты вращения. Таким образом, возможны

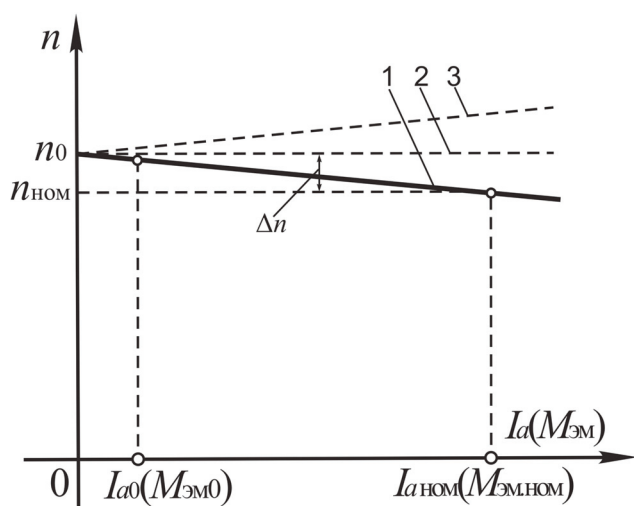


Рис. 3.1. Скоростные и механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

три вида скоростных характеристик, изображенных на рис. 3.1: 1 – при преобладании влияния $\Sigma I_a R_a$; 2 – при взаимной компенсации влияния $\Sigma I_a R_a$ и уменьшения потока Φ ; 3 – при преобладании влияния уменьшения потока Φ .

Характеристика вида 3 (рис. 3.1) неприемлема по условиям устойчивости работы.

Изменение частоты вращения Δn при переходе от холостого хода ($I_a = I_0$) к номинальной нагрузке ($I_a = I_{a.\text{ном}}$) мало и составляет 2...8 % от $n_{\text{ном}}$

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} 100 \% = 2 \dots 8 \ \%.$$

2. Механическая характеристика $n = f(M_{\text{эм}})$.

Определив из выражения $M_{\text{эм}} = c_m \Phi I_a$ значение I_a и подставив его в (3.4), получим уравнение механической характеристики

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{\Sigma R_a M_{\text{эм}}}{c_e c_m \Phi^2}. \quad (3.5)$$

В виду того, что изменение потока Φ относительно мало, механические характеристики двигателя параллельного возбуждения совпадают по виду с скоростными характеристиками (см. рис. 3.1). По этой же причине эти характеристики практически прямолинейны.

В двигателях независимого возбуждения изменение частоты вращения при переходе от холостого хода ($M_{\text{эм}} = M_{\text{эм}0}$) к номинальной нагрузке ($M_{\text{эм}} = M_{\text{эм.ном}}$) составляет лишь 2...5 %. Такие слабопадающие механические и скоростные характеристики называются жесткими. Двигатели параллельного (независимого) возбуждения применяются в установках, где необходимо поддерживать постоянную частоту вращения при изменении момента нагрузки, например, в станках, прокатных станах, вентиляторах и т.д. Они также широко применяются при необходимости регулирования частоты вращения в широком диапазоне. В этом случае подводимое к якору двигателя напряжение изменяется в широких пределах, в то время как напряжение возбуждения остается неизменным.

3. Моментная характеристика $M_{\text{эм}} = f(I_a)$. Аналитически эта характеристика описывается формулой (1.8)

$$M_{\text{эм}} = c_m \Phi I_a.$$

Как следует из этого выражения, если магнитная цепь двигателя ненасыщена и магнитный поток $\Phi = \text{const}$, то зависимость $M_{\text{эм}}(I_a)$ линейная и с ростом тока якоря электромагнитный момент пропорционально увеличивается. Моментная характеристика в этом случае соответствует изображенной на рис. 3.2 прямой сплошной линии, выходящей из начала координат.

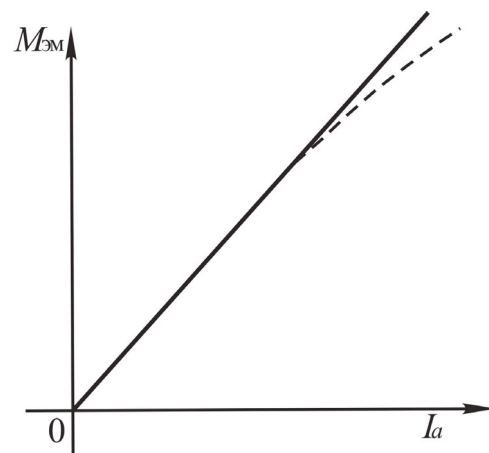


Рис. 3.2. Моментная характеристика двигателя независимого возбуждения

Действительная моментная характеристика вследствие уменьшения магнитного потока из-за размагничивающего действия реакции якоря будет отклоняться от прямой линии (штриховая линия на рис. 3.2).

Двигатели последовательного и смешанного возбуждения. Особенностью двигателя последовательного возбуждения является то, что его ток возбуждения равен току якоря ($I_b = I_a$), и поэтому для вывода выражений, определяющих вид его характеристик, предварительно необходимо

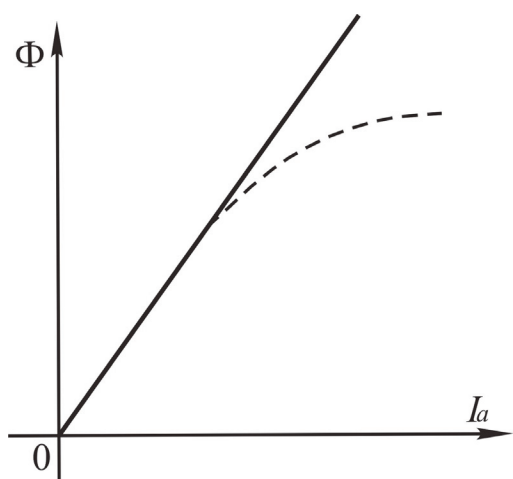


Рис. 3.3. Магнитная характеристика двигателя последовательного возбуждения

определить связь между магнитным потоком Φ и током якоря $I_a = I_b$. Зависимость $\Phi = f(I_a)$ называется магнитной характеристикой. Идеальная магнитная характеристика (без учета насыщения и размагничивающего действия реакции якоря) показана на рис. 3.3 сплошной линией, а реальная (с учетом насыщения и реакции якоря) – штриховой.

Все характеристики двигателя последовательного возбуждения получают при постоянном напряжении питания (обычно при $U = U_{ном}$).

1. Скоростная характеристика $n = f(I_a)$. Подставив в уравнение (3.4) выражение для потока в зависимости от тока якоря в соответствии с магнитной характеристикой, получим формулу скоростной характеристики двигателя. Для упрощения анализа пренебрежем насыщением магнитной цепи и будем считать магнитную характеристику линейной:

$$\Phi = k_\Phi I_a, \quad (3.6)$$

где k_Φ – коэффициент пропорциональности.

Тогда, подставив выражение (3.6) в уравнение (3.4), получим

$$n = \frac{U - I_a \sum R_a}{c_e k_\Phi \Phi I_a} = \frac{U}{c_e k_\Phi I_a} - \frac{\sum R_a}{c_e k_\Phi}. \quad (3.7)$$

Из уравнения (3.7) следует, что скоростная характеристика имеет гиперболический вид; на рис. 3.4 она изображена сплошной линией. Особенностью скоростной характеристики двигателя последовательного возбуждения является ее большая крутизна в области малых значений тока якоря.

Реальная скоростная характеристика с учетом размагничивающего действия реакции якоря будет отклоняться от гиперболической кривой вверх, как показано штриховой линией на рис. 3.4.

2. Механическая характеристика $n = f(M_{эм})$. При использовании соотношений (3.6) и (3.5) получим уравнение для механической характеристики:

$$n = \frac{\sqrt{c_m} U}{c_e \sqrt{k_\Phi} \sqrt{M_{эм}}} - \frac{\sum R_a}{c_e k_\Phi}. \quad (3.8)$$

Из выражения (3.8) следует, что механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения при $U = \text{const}$ так же, как и его скоростная характеристика, имеет практически гиперболический вид (см. рис. 3.5). Особенностью механической характеристики двигателя последовательного возбуждения является ее большая крутизна в области малых значений тока якоря.

При $M_{эм} \rightarrow 0$ частота вращения двигателя стремится к бесконечности. В этом случае говорят, что двигатель идет вразнос. Чрезмерное повышение частоты вращения опасно для механической прочности якоря, так как из-за больших значений центробежных сил, возникающих в этом случае, может нарушиться целостность бандажей, удерживающих обмотку якоря, и произойти разрушение коллектора. Следовательно, нельзя допускать работу двигателя последовательного возбуждения при холостом ходе и малых нагрузках, т.е. нагрузка не должна быть меньше 25...30 % номинальной. Лишь для двигателей малой мощности (десятки ватт) допустима работа при холостом ходе, так как их собственный момент потерь M_0 достаточно велик.

Вследствие сильной зависимости частоты вращения от нагрузки механические и скоростные характеристики двигателей последовательного возбуждения называют мягкими.

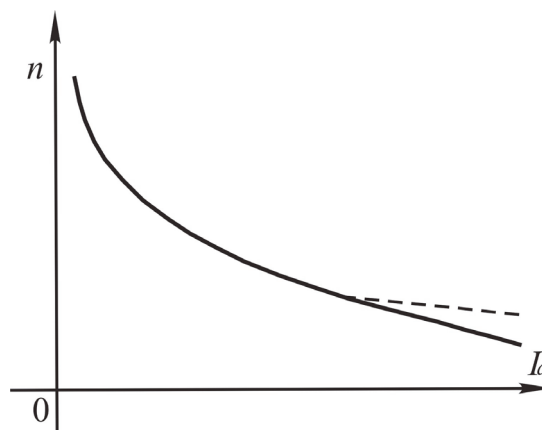


Рис. 3.4. Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения

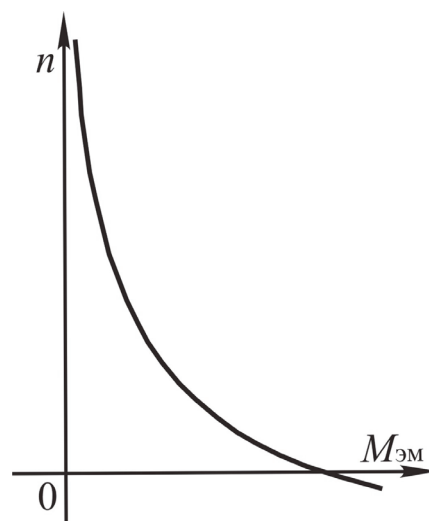


Рис. 3.5. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

В двигателях последовательного возбуждения электромагнитный момент имеет квадратичную зависимость от тока якоря, поэтому их применение предпочтительно, когда требуются большие пусковые моменты и наблюдаются частые перегрузки по моменту. Связано это с тем, что при одних и тех же колебаниях момента сопротивления ток и потребляемая мощность у двигателей последовательного возбуждения изменяются существенно меньше, чем у двигателей параллельного возбуждения. Двигатели последовательного возбуждения находят широкое применение на электрическом транспорте и в подъемных устройствах.

3. Моментная характеристика $M_{эм} = f(I_a)$. Подставив в уравнение (1.8) выражение (3.6), получим формулу для электромагнитного момента двигателя с последовательным возбуждением:

$$M_{эм} = c_m k_{\Phi} I_a^2. \quad (3.9)$$

Из выражения (3.9) следует, что электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока якоря, т. е. моментная характеристика имеет параболический вид; на рис. 3.6 она изображена сплошной линией. С учетом размагничивающего действия реакции якоря момент в области больших токов будет меньше момента, получаемого по выражению (3.9) (штриховая линия на рис. 3.6).

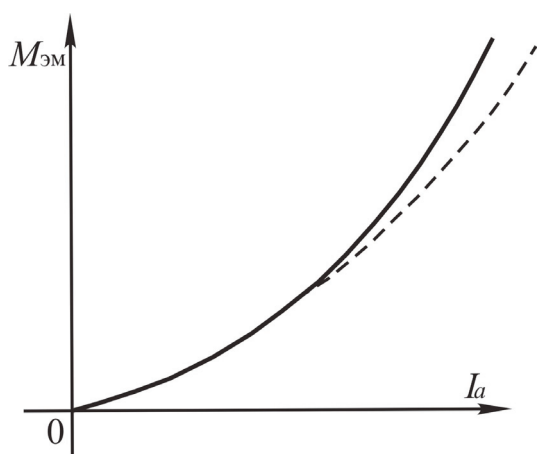


Рис. 3.6. Моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения

Характеристики двигателей смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения. При слабой последовательной обмотке они будут приближаться к характеристикам двигателя параллельного возбуждения, а при сильной — к характеристикам двигателя последовательного возбуждения.

3.3. Пуск двигателей постоянного тока

Для двигателей постоянного тока могут быть применены три способа пуска:

- прямой, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети;
- реостатный, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока;

– путем плавного повышения питающего напряжения, которое подается на обмотку якоря.

При $n = 0$ также $E = 0$ и согласно выражению (3.2) пусковой ток

$$I_{ап} = U/\Sigma R_a.$$

Поскольку сопротивление цепи якоря ΣR_a невелико, то при пуске с номинальным напряжением ($U = U_{ном}$) ток якоря в 10...50 раз будет превышать свое номинальное значение, что создает опасность поломки вала машины, так как в соответствии с (1.8) пропорционально росту тока увеличивается электромагнитный момент. Кроме того из-за большого тока возникает сильное искрение под щетками. Поэтому прямой пуск применяют в основном для двигателей малой мощности, в которых сопротивление ΣR_a относительно велико.

Самым распространенным является пуск с помощью пускового реостата (рис. 3.7) на примере двигателя с параллельным возбуждением.

В начальный момент пуска при $n = 0$ пусковой ток $I_{ап} = U/(\Sigma R_a + R_{п})$. Начальное напряжение при пуске должно обеспечивать в первый момент пуска пусковой ток в цепи якоря $I_{ап} \leq 2,5 I_{аном}$.

В начальный период пуск осуществляется по реостатной характеристике 6 (рис. 3.8, а), соответствующей максимальному значению сопротивления $R_{п}$ пускового реостата (РП); при этом двигатель развивает максимальный пусковой момент $M_{эм.п.мах}$. Регулировочный реостат $R_{в}$ в этом случае выводится так, чтобы ток возбуждения $I_{в}$ и поток Φ были максимальными. По мере разгона момент двигателя уменьшается, так как с увеличением частоты вращения возрастает ЭДС E и уменьшается ток якоря $I_{ап} = (U - E)/(\Sigma R_a + R_{п})$.

При достижении некоторого значения $M_{эм.п.мин}$ часть сопротивления пускового реостата выводится, вследствие чего момент снова возрастает до $M_{эм.п.мах}$. При этом двигатель переходит на работу по реостатной характеристике 5 и разгоняется до значения $M_{эм.п.мин}$.

Таким образом, уменьшая постепенно сопротивление пускового реостата, осуществляют разгон двигателя по отдельным отрезкам реостатных характеристик 6, 5, 4, 3 и 2 (см. жирные линии на рис. 3.8, а) до выхода на естественную характеристику 1. Средний вращающий момент при пуске $M_{эм.п.ср} = 0,5(M_{эм.п.мах} + M_{эм.п.мин}) = \text{const}$, вследствие чего двигатель разгоняется с некоторым постоянным ускорением.

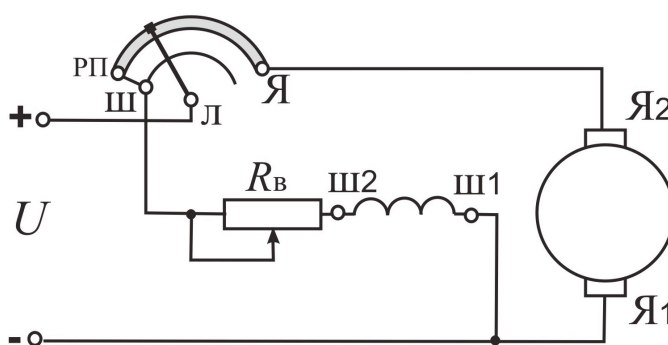


Рис. 3.7. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения с помощью пускового реостата:
Я, Ш, Л – выводы пускового реостата для подключения соответственно обмоток якоря, возбуждения и сети (линия)

Таким же способом пускается в ход двигатель с последовательным возбуждением (рис. 3.8, б). Количество ступеней пускового реостата зависит от жесткости характеристики и требований, предъявляемых к плавности пуска (допустимой разности $M_{\text{эм.п.макс}} - M_{\text{эм.п.мин}}$). Пусковые реостаты рассчитывают на кратковременную работу под током.

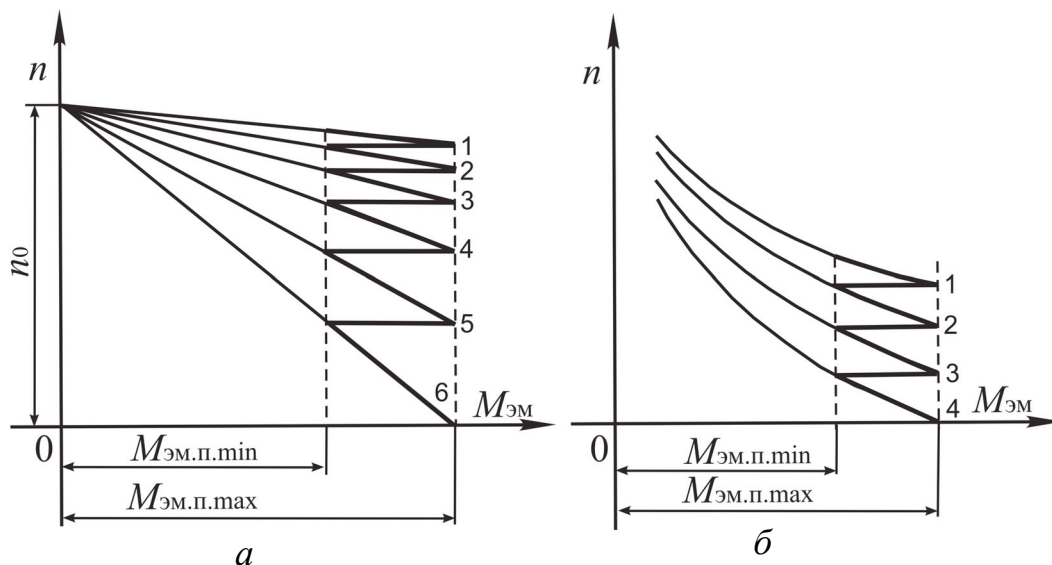


Рис. 3.8. Графики изменения частоты вращения при реостатном пуске двигателя с параллельным (а) и последовательным (б) возбуждением

При выводе отдельных ступеней пускового реостата ток якоря I_a достигает некоторого максимального значения, а затем уменьшается до минимального значения. В соответствии с изменением тока якоря изменяется и электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, обеспечивающий разгон двигателя до установившейся частоты вращения.

При реостатном пуске возникают довольно значительные потери энергии в пусковом реостате. Этот недостаток можно устранить, если пуск двигателя осуществить при пониженном напряжении с последующим плавным повышением напряжения, подаваемого на его обмотку. Однако для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель). Напряжение источника при пуске плавно увеличивают при включении двигателя, что позволяет избежать больших толчков тока. Начальное напряжение при пуске должно обеспечивать в первый момент при $n = 0$ пусковой ток в цепи якоря $I_{\text{ап}} \leq 2,5I_{\text{аном}}$.

3.4. Регулирование частоты вращения двигателей

Согласно уравнению (3.4), частоту вращения двигателя можно регулировать тремя способами: изменением напряжения якоря U , изменением сопротивления цепи якоря ΣR_a и изменением потока возбуждения Φ . При сопоставлении характеристик двигателя в процессе регулирования за исходную принимают скоростную или механическую характеристики, полученные при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения, а также при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря. Такую характеристику называют естественной. Характеристики, полученные при ненормальных значениях напряжения и тока возбуждения или при наличии добавочного сопротивления в цепи якоря, называют искусственными.

При рассмотрении регулирования частоты вращения двигателя способом **изменения подводимого напряжения** полагают неизменными сопротивление цепи якоря и ток возбуждения. В этом случае частота вращения двигателя постоянного тока примерно пропорциональна приложенному напряжению U . Поскольку работа двигателя при $U > U_{\text{ном}}$ обычно недопустима по потенциальным условиям работы коллектора, то данный способ позволяет регулировать частоту вращения вниз от значения, соответствующего естественной характеристике.

Для осуществления этого способа регулирования необходимо цепь якоря двигателя подключить к источнику питания с регулируемым напряжением. Для управления двигателями малой и средней мощности в качестве такого источника можно применить регулируемый выпрямитель, в котором напряжение постоянного тока меняется регулировочным автотрансформатором, включенным на входе выпрямителя.

Для управления двигателями большой мощности целесообразно применять систему «генератор-двигатель».

Скоростные $n = f(I_a)$ и механические $n = f(M_{\text{эм}})$ характеристики двигателя независимого возбуждения при $I_b, \Sigma R_a = \text{const}$ и $U = \text{var}$ показаны на рис. 3.9. Эти характеристики представляют собой параллельные прямые линии, поскольку при одном и том же токе якоря I_a падение напряжения $I_a \Sigma R_a$ и размагничивающее действие реакции якоря для них одинаковые.

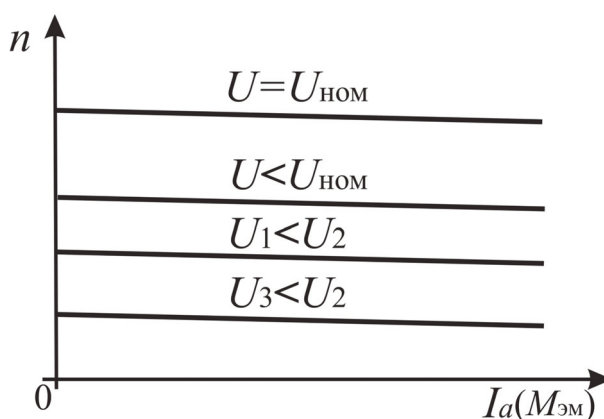


Рис. 3.9. Скоростные и механические характеристики двигателя при плавном изменении напряжения, подводимого к цепи якоря

Регулирование частоты вращения изменением напряжения, рассмотренное на примере двигателей параллельного и независимого возбуждения, применимо и для двигателей последовательного и смешанного возбуждения. Путем изменения подводимого напряжения можно получить диапазон регулирования скорости от 10:1 до 100:1. Кроме того, при этом способе регулирования частоты вращения КПД двигателя практически остается неизменным. Регулирование целесообразно осуществлять при постоянном моменте.

При рассмотрении способа **изменением сопротивления цепи якоря**, регулирования частоты вращения двигателя полагают неизменными ток возбуждения I_v двигателя и напряжение сети U . Для изменения сопротивления ΣR_a в цепь якоря последовательно включают регулировочный реостат $R_{ад}$ (рис. 3.10).

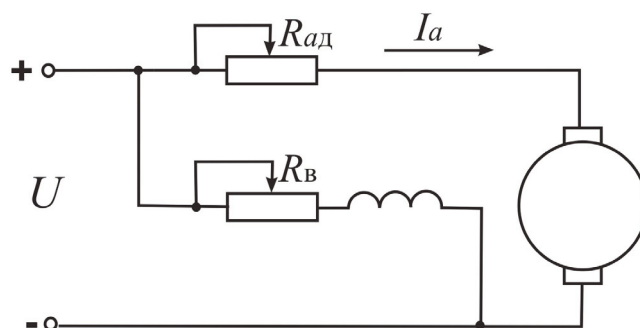


Рис. 3.10. Схема включения регулировочного реостата $R_{ад}$ в цепь якоря

При включении реостата в цепь якоря частота вращения с ростом нагрузки уменьшается более резко, чем при работе двигателя без реостата:

$$n = \frac{U - I_a(\Sigma R_a + R_{ад})}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a(\Sigma R_a + R_{ад})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n.$$

Это показано на рис. 3.11, где приведены скоростные и механические характеристики двигателя независимого и параллельного возбуждения: 1 – естественная (при $R_{ад} = 0$); 2 – реостатная (при $R_{ад} > 0$). Частоты вращения при холостом ходе для обеих характеристик равны, значения Δn (уменьшение частоты вращения при нагрузке) различны. При одном и том же токе якоря отношение $\Delta n_{реост} = \Sigma R_a / (\Sigma R_a + R_{ад})$. Чем больше сопротивление регулировочного реостата $R_{ад}$, тем круче с увеличением нагрузки падает частота вращения.

Механические характеристики $n = f(M_{эм})$ двигателя с параллельным возбуждением можно получить из скоростных характеристик $n = f(I_a)$ путем изменения масштаба по оси абсцисс, так как для двигателя этого типа $M_{эм} = c_m \Phi I_a$ (момент пропорционален току якоря).

Рассматриваемым способом можно уменьшать частоту вращения в широких пределах, вплоть до нулевого значения. Однако при низких частотах вращения механические характеристики оказываются крутопадающими, что соответствует нестабильной работе двигателя. Нестабильность заключается в том, что небольшие колебания момента сопротивления M_c вызывают относительно большие колебания частоты вращения или даже остановку двигателя. Это обстоятельство

во многих случаях ограничивает пределы регулирования частоты вращения данным способом. Диапазон регулирования скорости при номинальном моменте обычно не превышает 10:1.

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления цепи якоря, рассмотренное на примере двигателей параллельного и независимого возбуждения, применимо и для двигателей последовательного и смешанного возбуждения.

Изменение магнитного потока. При рассмотрении этого способа регулирования полагают неизменными сопротивление и напряжение цепи якоря. Регулирование магнитного потока при этом осуществляется изменением тока возбуждения двигателя. Так как в номинальном режиме, соответствующем естественной характеристике, магнитная цепь двигателя рассчитывается на работу почти с максимальным значением магнитного потока (на колене характеристики холостого хода), то увеличение тока возбуждения не приводит к заметному росту потока. Поэтому поток изменяют в сторону уменьшения от расчетного значения путем снижения тока возбуждения.

Уменьшение магнитного потока, как следует из формулы (3.4), приводит к увеличению частоты вращения, т. е. в этом случае осуществляется регулирование частоты вращения вверх от основного значения. Если не учитывать изменение магнитного потока из-за реакции якоря, то скоростные характеристики $n = f(I_a)$ двигателей независимого и параллельного возбуждения (при $U = \text{const}$; $I_b = \text{const}$) будут представлять собой прямые линии – сплошные на рис. 3.12. С уменьшением магнитного потока увеличивается скорость холостого хода. Все скоростные характеристики выходят из одной точки, соответствующей току короткого замыкания двигателя

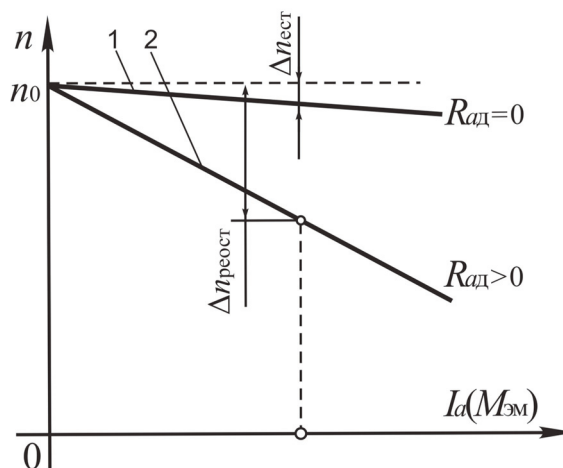


Рис. 3.11. Скоростные и механические характеристики при изменении сопротивления цепи якоря

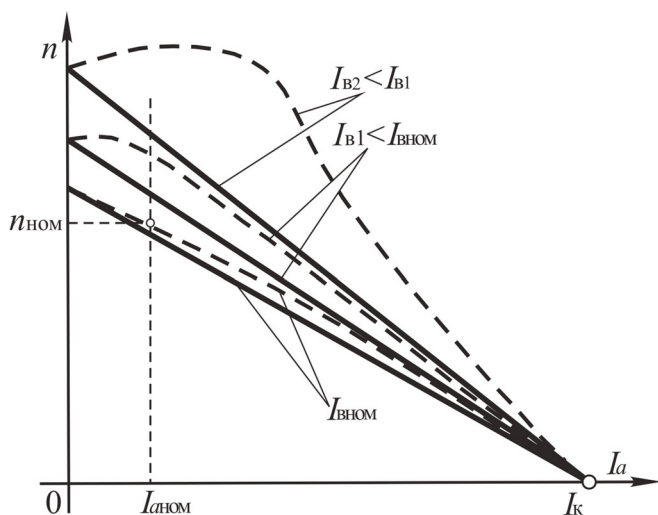


Рис. 3.12. Скоростные характеристики двигателей независимого (параллельного) возбуждения при изменении тока возбуждения

сплошными на рис. 3.13. Из рис. 3.13 видно, что механические характеристики пересекаются между собой, поэтому при моментах сопротивления, лежащих правее точек пересечения, уменьшение магнитного потока будет

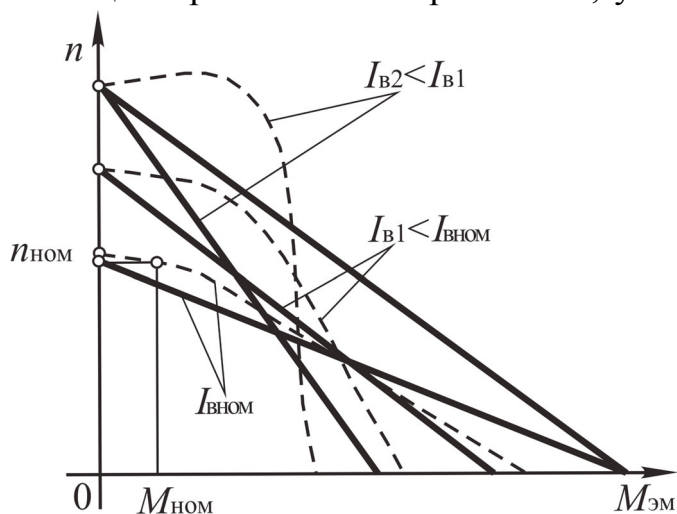


Рис. 3.13. Механические характеристики двигателей независимого (параллельного) возбуждения при изменении тока возбуждения

вызывать не увеличение частоты вращения, а ее уменьшение. Следовательно, чем больше сопротивление цепи якоря ΣR_a , тем меньшим значениям момента будут соответствовать точки пересечения механических характеристик. У двигателей мощностью несколько киловатт и более точки пересечения механических характеристик находятся вне рабочей зоны (где момент сопротивления больше номинального), поэтому в пределах рабочей зоны

$I_k = U/\Sigma R_a$. Механические характеристики $n = f(M_{эм})$, приведенные на рис. 3.13, при тех же скоростях холостого хода, что и скоростные характеристики, с осью абсцисс будут пересекаться в разных точках, так как при одном для всех характеристик токе короткого замыкания потоки и, следовательно, пусковые моменты будут различными. Если не учитывать влияние реакции якоря, то механические характеристики будут представлять собой прямые линии —

вызывать не увеличение частоты вращения, а ее уменьшение. Следовательно, чем больше сопротивление цепи якоря ΣR_a , тем меньшим значениям момента будут соответствовать точки пересечения механических характеристик. У двигателей мощностью несколько киловатт и более точки пересечения механических характеристик находятся вне рабочей зоны (где момент сопротивления больше номинального), поэтому в пределах рабочей зоны

частота вращения с уменьшением магнитного потока возрастает. Уменьшение частоты вращения при ослаблении поля может наблюдаться только в машинах малой мощности.

На рис. 3.12 – 3.13 штриховыми линиями показаны соответственно скоростные и механические характеристики с учетом влияния размаг-

ничающего действия реакции якоря. При малых токах возбуждения они могут иметь возрастающий характер, а работа двигателя при возрастающих характеристиках будет неустойчивой. Уменьшение магнитного потока из-за размагничивающего действия реакции якоря приводит также к уменьшению пускового момента.

Неустойчивая работа двигателя при малых токах возбуждения является одной из причин, ограничивающих верхний предел частоты вращения при этом способе регулирования. Другой причиной, ограничивающей максимальную частоту вращения двигателя, является ухудшение коммутации. Обычно дополнительные полюсы в машинах постоянного тока настраиваются на получение несколько ускоренной коммутации, поэтому значение коммутирующей ЭДС выбирается несколько большим, чем требуется для компенсации реактивной ЭДС. При повышении частоты вращения пропорционально увеличиваются коммутирующая и реактивная ЭДС, а следовательно, и их разность, которая при определенной частоте вращения может достигнуть недопустимого значения. В этом случае коммутация будет сильно ускоренной, появится ток разрыва и усилится искрение под щетками, т. е. нормальная работа машины будет невозможна. Кроме того, коммутация при высоких частотах вращения ухудшается вследствие повышения вибрации щеточного аппарата и увеличения максимального напряжения между соседними коллекторными пластинами из-за сильного искажения магнитного поля двигателя.

Изменение магнитного потока в двигателях последовательного возбуждения осуществляется шунтированием обмотки возбуждения с помощью реостата $R_{ш}$ (рис. 3.14, а). Чем меньше сопротивление, тем меньше ток возбуждения I_B и магнитный поток Φ , а значит, больше частота вращения n .

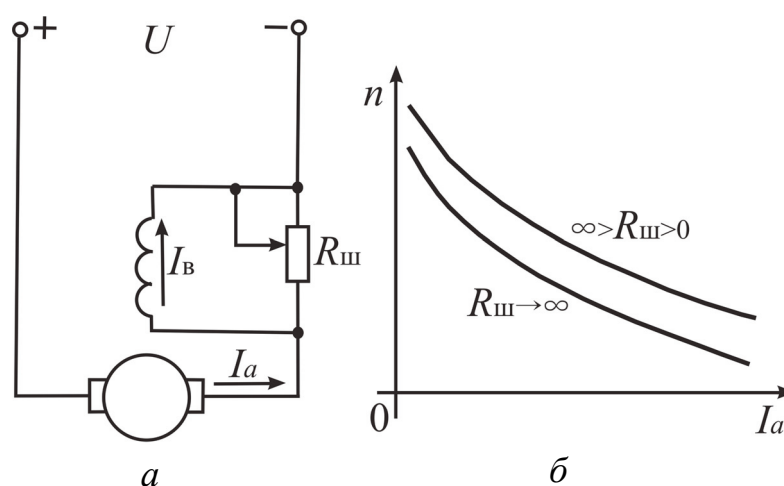


Рис. 3.14. Схемы включения шунтирующего реостата $R_{ш}$ (а) и скоростные характеристики двигателя последовательного возбуждения (б) при изменении тока возбуждения

На рис. 3.14, б показаны естественная скоростная характеристика ($R_{ш} \rightarrow \infty$) и одна из регулировочных характеристик ($\infty > R_{ш} > 0$) двигателя последовательного возбуждения.

Из-за ограничения максимальной скорости в двигателях нормального исполнения диапазон регулирования их частоты вращения путем изменения магнитного потока составляет $(1,5 \dots 2,5):1$. Тем не менее регулирование частоты вращения изменением магнитного потока является одним из наиболее простых и экономичных способов и поэтому находит широкое применение. Увеличение механических потерь при повышении частоты вращения двигателей приводит к некоторому уменьшению их КПД.

Для **изменения направления вращения** (реверсирования) двигателя необходимо изменить направление вращающего электромагнитного момента $M_{эм} = c_m I_a \Phi$. Это можно осуществить двумя способами: изменением направления тока якоря I_a или изменением направления магнитного потока Φ за счет изменения тока возбуждения. Для этого необходимо поменять местами провода, подводящие ток к обмотке якоря или обмотке воз-

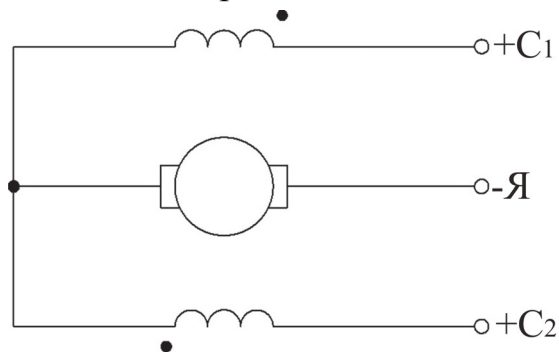


Рис. 3.15. Схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с двумя обмотками возбуждения

буждения. Однако устройства для коммутации получаются проще, меньше по габаритам и массе, дешевле, если переключать провода обмотки возбуждения.

Для реверсивных исполнительных механизмов, например, различных выдвижных опор кранов, упоров, захватов, часто применяются двигатели последовательного возбуждения с двумя обмотками возбуждения (рис. 3.15).

Точками показаны начала обмоток. Реверсирование осуществляется изменением полярности полюсов при сохранении знака тока в обмотке якоря. Одна обмотка применяется при вращении в одну сторону, другая – для обратного направления вращения.

Следует отметить, что при одновременном изменении знаков I_a и Φ направление вращения двигателя не меняется $M_{эм} = c_m (-I_a)(-\Phi) = c_m I_a \Phi$. Это свойство позволяет использовать машины постоянного тока и для работы на переменном токе. Однако универсальные коллекторные машины, примером которых может служить широко распространенная электрическая дрель, в отличие от двигателей постоянного тока последовательного возбуждения имеют сердечник статора (индуктора), набранный из листов электротехнической стали, что позволяет уменьшить потери на вихревые токи.

3.5. Останов двигателей

При снятии питания с двигателя его ротор продолжает еще некоторое время вращаться. В ряде случаев, например, в приводах временных и программных механизмов, требуется уменьшение времени выбега, то есть быстрый останов. Для этого применяют режимы электрического торможения двигателя.

Динамическое торможение осуществляется путем перевода отключенного от сети и вращающегося по инерции двигателя в генераторный режим. Для этого обмотка возбуждения остается подключенной к сети, а обмотка якоря, отключенная от сети, замыкается накоротко или на балластный резистор. Во вращающемся в магнитном поле якоря наводится ЭДС, которая создает ток якоря и тормозной электромагнитный момент. Частота вращения двигателя и приводимого им механизма быстро уменьшается. Время выбега двигателя значительно уменьшается.

Этот способ широко применяется в технике для быстрого и точного останова различных механизмов.

Торможение противовключением возникает, когда изменяется направление вращающегося электромагнитного момента, то есть путем перевода двигателя в режим реверса. Торможение получается достаточно эффективным, однако в момент останова двигатель надо отключить от сети, иначе он начнет вращаться в противоположном направлении.

При торможении противовключением двигатель работает в крайне тяжелом режиме, поэтому в устройствах автоматики этот способ применяется редко.

Генераторное рекуперативное торможение возникает тогда, когда двигатель приводится во вращение исполнительным механизмом с частотой вращения больше частоты вращения холостого хода. Такой режим возникает в двигателях параллельного и смешанного возбуждения, например, в электролебедке при спуске груза, в электрическом транспорте при спуске с горы. Двигатель в этом случае работает в генераторном режиме с ЭДС больше напряжения сети и отдает (рекуперировывает) электрическую энергию в сеть.

Этот вид торможения возникает автоматически и является наиболее экономичным. Однако он возникает только в специфических условиях работы двигателя.

4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1. Общие вопросы машин переменного тока

Электрическими машинами переменного тока называются такие машины, которые служат для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую (в двигателях) или, наоборот, механической энергии в электрическую (в генераторах).

Работа любой электрической машины переменного тока основана на использовании вращающегося магнитного поля, создаваемого многофазными обмотками.

Существуют два основных типа машин переменного тока: синхронные и асинхронные (несинхронные). В свою очередь, асинхронные машины бывают с короткозамкнутым ротором и с ротором, имеющим контактные кольца (фазный ротор).

В **синхронных** машинах нормальных типов ротор вращается с такой же частотой n и в том же направлении, как и вращающееся магнитное поле n_1 (n_1 – частота вращения магнитного поля). Частота вращения ротора n не зависит от нагрузки: вращение ротора происходит в такт, или синхронно, с вращающимся полем ($n = n_1$), откуда и происходит название этого вида машин.

В синхронных машинах частота вращения ротора n находится в строго постоянном отношении к частоте сети f_1 , а именно:

$$n = \frac{60f_1}{p} \quad \text{или} \quad f_1 = \frac{pn}{60}, \quad (4.1)$$

где p – число пар полюсов машины.

Таким образом, у синхронных двигателей частота вращения n зависит только от частоты сети f_1 , а у синхронных генераторов частота ЭДС f_1 определяется частотой их вращения n .

Асинхронной называется такая машина, частота вращения ротора которой n при заданной частоте сети f_1 зависит от нагрузки и в которой, следовательно, однозначной зависимости между частотой вращения и частотой сети не существует, т. е.

$$n \neq \frac{60f_1}{p} \quad \text{или} \quad n \neq n_1.$$

Таким образом, в асинхронных машинах ротор вращается несинхронно, или асинхронно, по отношению к вращающемуся магнитному полю, чем и обусловлено название этих машин.

Оба типа машин (синхронные и асинхронные) имеют две основные части: неподвижную (статор) и вращающуюся (ротор).

Синхронная машина возбуждается постоянным током, который подводится к ее обмотке возбуждения при помощи контактных колец и щеток от сети постоянного тока или от специальной машины постоянного тока, называемой возбудителем. Обмотка располагается на полюсах ротора. На статоре таких машин размещается обмотка якоря, подключаемая к электрической сети. Синхронные машины малой мощности могут выполняться с возбуждением от постоянных магнитов или в виде так называемой реактивной машины, которая не имеет специальной обмотки возбуждения.

В асинхронных машинах магнитное поле создается переменным током, подводимым к ним от какого-нибудь источника переменного тока. Такие машины возбуждаются реактивной составляющей переменного тока сети, к которой подключена обмотка статора, т. к. для создания основного магнитного потока асинхронная машина специальной обмотки возбуждения или постоянных магнитов не имеет.

Синхронные и асинхронные машины обладают **принципом обратимости** и поэтому могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные машины используются в качестве генераторов для производства электрической энергии переменного тока и в качестве двигателей постоянной частоты вращения. Асинхронные машины применяются преимущественно в качестве двигателей.

В отличие от машин постоянного тока, в которых магнитное поле в пространстве неподвижно и при заданном режиме неизменно по величине, в синхронных и асинхронных машинах магнитные поля являются вращающимися или пульсирующими.

Наличие вращающихся и пульсирующих магнитных полей определяет принцип действия, свойства и особенности машин переменного тока.

4.2. Устройство многофазных обмоток

В электрических машинах переменного тока обмотки размещают в пазах, расположенных на внутренней поверхности статора и на внешней поверхности ротора. Проводники, находящиеся в пазах, соединяют между собой, при этом образуется ряд катушек (рис. 4.1). Расположенные в соседних пазах катушки, соединенные последовательно и относящиеся к одной фазе, образуют **катушечную группу**. В общем случае каждая фаза обмотки состоит из нескольких катушечных групп, соединенных последовательно или параллельно. Параллельное соединение применяют при больших фазных токах или при необходимости переключения отдельных катушечных групп.

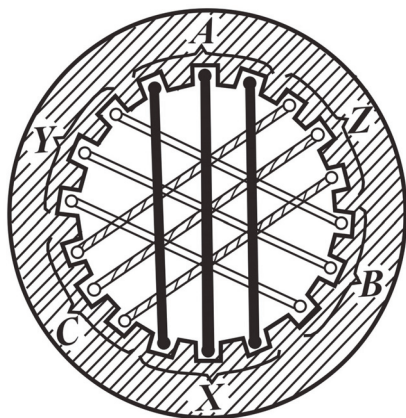


Рис. 4.1. Расположение катушек трехфазной обмотки на статоре

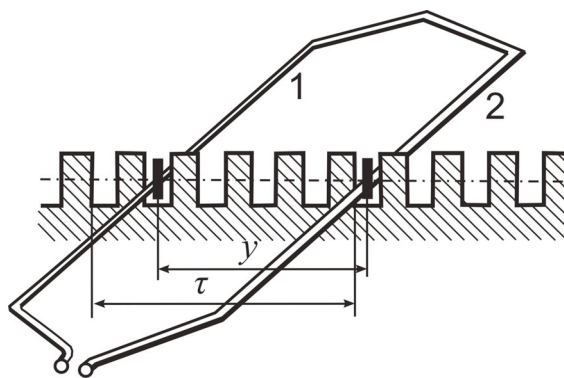


Рис. 4.2. Виток катушки из двух проводников

Простейшим элементом обмотки является **виток** (рис. 4.2), состоящий из двух или нескольких параллельных проводников 1 и 2, которые размещены в пазах, находящихся друг от друга на некотором расстоянии y . Это расстояние (шаг обмотки) приблизительно равно одному **полюсному делению** τ , под которым понимают длину дуги, соответствующую одному полюсу:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

где D – диаметр внутренней расточки статора (для обмотки статора) или диаметр ротора (для обмотки ротора); p – число пар полюсов.

Полюсное деление выражают не только в единицах длины, но и в числе пазовых делений: $\tau = Z/2p$ (Z – общее число пазов статора или ротора) или в электрических градусах. При этом два полюсных деления соответствуют 360 эл. град., а τ – 180 эл. град.

Когда $y = \tau$, шаг называют **диаметральным** или **полным**, при $y < \tau$ – **укороченным**, при $y > \tau$ – **удлиненным**.

Часто шаг выражают в относительных единицах в виде $\beta = y/\tau$, разность $1 - y/\tau$ называют **укорочением шага**.

Обычно витки, образованные проводниками, лежащими в одних и тех же пазах, объединяют в одну или две катушки (рис. 4.3). Иногда их называют **секциями**. Их укладывают таким образом, чтобы в каждом пазу были размещены одна сторона катушки или две стороны разных катушек – одна над другой. В соответствии с этим различают одно- и двухслойные обмотки.

Расположенные в соседних пазах стороны катушек одной катушечной группы занимают q пазов и образуют фазную зону с углом $\alpha = 2\pi pq/Z$.

В обмотках трехфазных машин (число фаз $m = 3$) обычно на каждом полюсном делении τ располагается три катушечных группы по q пазов в каждой. При этом фазная зона занимает дугу окружности статора или ротора, равную $\pi D/2pt = \tau/m = 2\pi/6 = 60$ эл. град.; такие обмотки называют шестизонными. В ряде случаев применяют обмотки, в которых $3q$ пазов занимают два полюсных деления. Фазная зона в таких обмотках занимает $2\tau/m = 2\pi/3 = 120$ эл. град.; эти обмотки называют трехзонными.

Для трехфазных двигателей наивыгоднейшими являются шести-зонные обмотки, так как при одинаковом числе пазов в машине эффективное число витков в фазе в такой обмотке увеличивается в 1,15 раза по сравнению с трехзонной обмоткой. С трехзонной обмоткой выполняют только однообмоточные двухскоростные двигатели и двигатели с $q = 0,5$.

Однофазные обмотки выполняют с углом $\alpha = 2\pi/3$, т.е. с заполнением $2/3$ пазов, а двухфазные обмотки – с $\alpha = 2\pi/2$.

Для шестизонных обмоток число катушек в катушечной группе

$$q = \frac{Z}{2pt}.$$

Эта величина также представляет собой число пазов, приходящихся на полюс и фазу.

В обмотке статора, представленной на рис. 4.1, каждая фаза (A-X, B-Y и C-Z) состоит из трех катушек, стороны которых расположены в трех смежных пазах, т. е. $q = 3$. В общем случае в трехфазной обмотке на одном полюсном делении расположено $3q$ пазов. При $q = 1$ под каждым полюсом расположено только по одной катушке каждой фазы. Такую обмотку называют **сосредоточенной**, а при $q > 1$ – **распределенной**.

Обмотки в большинстве случаев выполняют с целым числом пазов на полюс и фазу. При дробном q углы фазных зон только в среднем равны $2\pi/6$ или $2\pi/3$; в реальной машине часть фазных зон имеет углы α меньшие, а часть – большие этих значений.

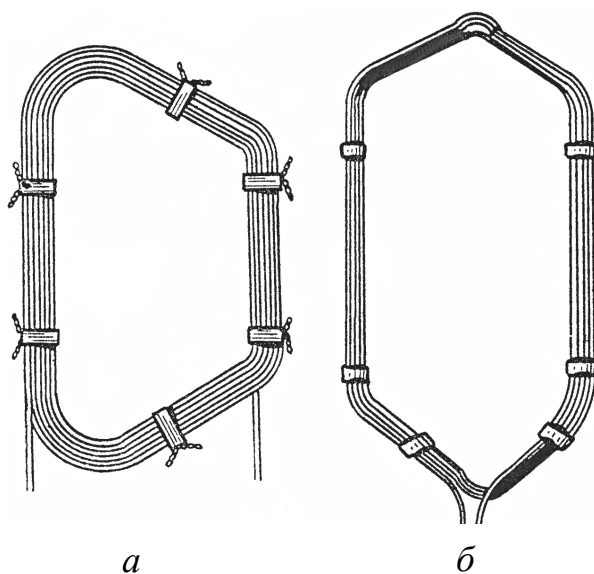


Рис. 4.3. Устройство катушек обмотки статора при однослойной (а) и двухслойной (б) обмотках

4.3. Вращающееся магнитное поле

Вращающееся магнитное поле создается системой многофазных токов (двух-, трех-, шестифазных и т.д.). Вращающееся магнитное поле представляет собой волну индукции, бегущую вдоль окружности рабочего воздушного зазора между статором и ротором машины переменного тока. Наибольшее распространение в технике нашла система трехфазного переменного тока. Поэтому рассмотрим получение вращающегося магнитного поля с помощью трехфазного переменного тока.

На рис. 4.4 представлены поперечные разрезы двухполюсного ($2p = 2$) асинхронного двигателя и показан характер магнитного поля статора для двух моментов времени.

На рис. 4.4 изображена простейшая обмотка статора, когда каждая фаза состоит из одного витка или двух проводников (1-я фаза – проводники A и X , 2-я фаза – проводники B и Y , 3-я фаза – проводники C и Z). Проводники каждого витка (фазы) расположены друг от друга на расстоянии полюсного деления τ .

На рис. 4.4 полюсное деление составляет половину окружности. Шаг витка или обмотки y поэтому является полным ($y = \tau$). Двойному полюсному делению 2τ соответствует угол по окружности статора 360° эл. Начала фаз A , B , C сдвинуты относительно друг друга на 120° эл., что в данном случае составляет треть окружности.

На рис. 4.4, *а* показаны направления токов в проводниках обмотки статора для момента времени, когда $i_a = I_m$ и $i_b = i_c = -1/2 I_m$. Токи фаз считаются положительными, когда они в началах фаз (проводники A , B , C) направлены за плоскость чертежа. На рис. 4.4, *б* показаны направления токов для момента времени, когда фазы токов изменились на 30° и

$$i_a = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m; \quad i_b = 0; \quad i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m.$$

Из рис. 4.4 видно, что распределение токов по окружности статора составляет две зоны, каждая величиной τ , причем направления токов в этих зонах противоположны. В нижней части рис. 4.4 изображены кривые распределения токов вдоль развернутого статора.

Из этих кривых видно, что токи распределены на поверхности статора по синусоидальному закону.

Токи проводников обмотки статора двухполюсной машины создают, как следует из рис. 4.4, двухполюсный магнитный поток Φ_1 , проходящий через статор, ротор и воздушный зазор между ними. Из сравнения рис. 4.4, *а* и *б* видно, что при изменении фазы токов на 30° кривая распределения токов и магнитный поток поворачиваются в направлении следования фаз также на 30° эл.

Ось витка (обмотки) фазы A на рис. 4.4 направлена горизонтально, и ось магнитного потока при $i_a = I_m$ (см. рис. 4.4, a) также направлена горизонтально. Ясно, что если фаза токов по сравнению с рис. 4.4, a изменится на 120° и поэтому будет $i_b = I_m$, то магнитный поток будет направлен по оси фазы B , т. е. повернется на 120° эл. В момент времени, когда $i_c = I_m$, ось магнитного потока совпадает с осью фазы C и т.д.

Таким образом, обмотка статора двухполюсной машины при питании ее трехфазным током создает двухполюсное вращающееся магнитное поле.

При этом за один период изменения тока поле поворачивается на 2τ или 360° эл.

Скорость вращения поля $n_1 = f_1$.

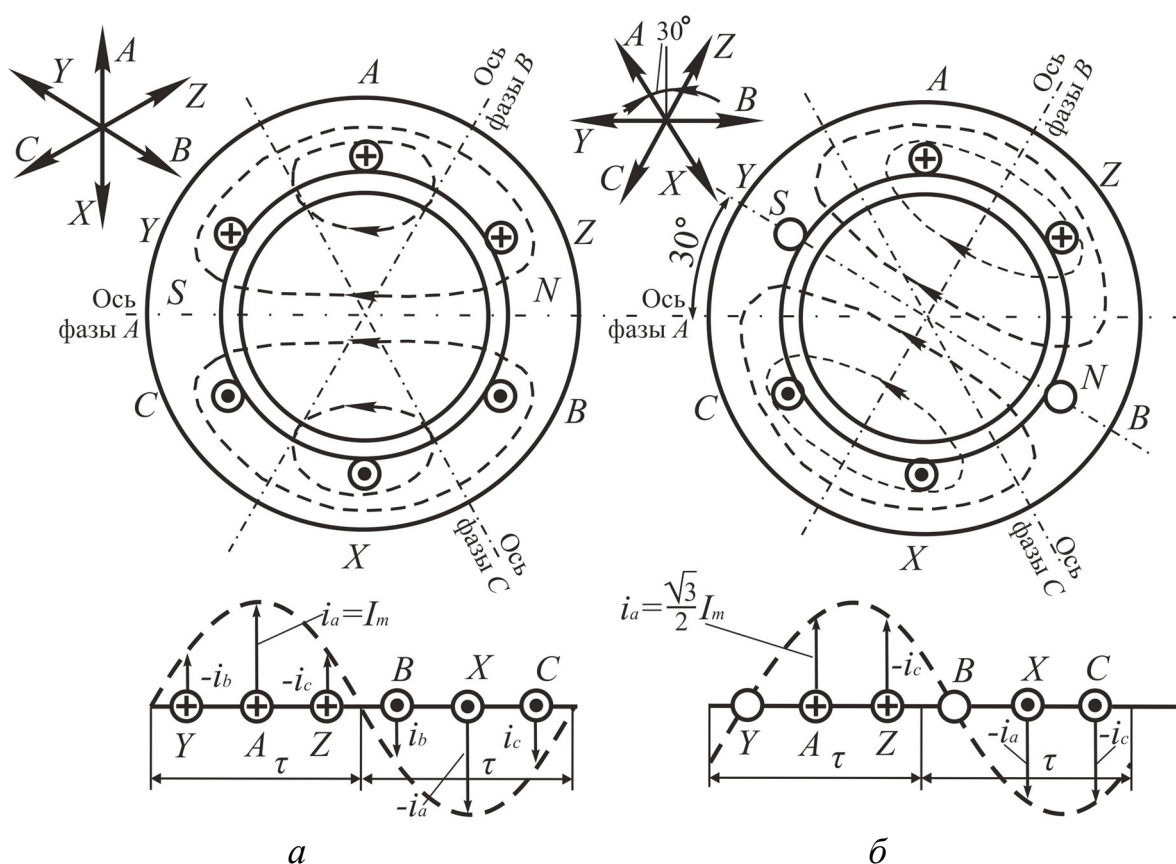


Рис. 4.4. Простейшая обмотка статора асинхронной машины с $2p = 2$ и ее магнитное поле

Магнитное поле вращается в направлении чередования фаз A, B, C обмотки статора. Для изменения направления вращения поля на обратное достаточно переменить местами на зажимах обмотки статора концы двух проводников, идущих от питающей сети.

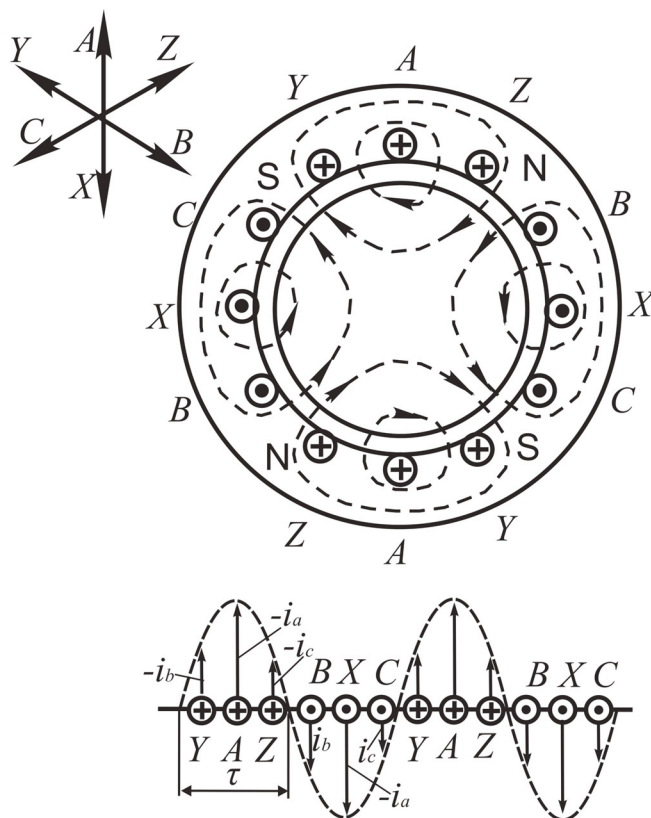


Рис. 4.5. Простейшая обмотка статора асинхронной машины с $2p = 4$ и ее магнитное поле

При $2p = 4$ полюсное деление составляет четверть окружности и каждая фаза простейшей трехфазной обмотки статора (рис. 4.5) состоит из двух витков с шагом $y = \tau$, которые сдвинуты относительно друг друга на 2τ и могут быть соединены друг с другом последовательно или параллельно. Отдельные фазы и их начала A, B, C при этом также сдвинуты относительно друг друга на 120° эл. или в данном случае на $1/6$ окружности. Из рис. 4.5 видно, что такая обмотка создает кривую распределения тока и магнитное поле с $2p = 4$. Это поле также является вращающимся и за один период тока поворачивается тоже на 2τ или в данном случае на половину окружности, вследствие чего скорость поля

$$n_1 = \frac{f_1}{2}.$$

В общем случае можно изготовить обмотку с $2p = 6, 8, 10$ и т.д. При этом будет получаться кривая распределения тока и магнитное поле с p парами полюсов. Магнитное поле вращается со скоростью в оборотах в секунду

$$n_1 = \frac{f_1}{p};$$

или в оборотах в минуту

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$

Линейная окружная скорость вращения поля вдоль окружности статора

$$v_1 = \pi D n_1 = 2 p \tau \frac{f_1}{p} = 2 \tau f_1.$$

При промышленной частоте 50 Гц максимальная синхронная частота вращения, которую может иметь поле асинхронного двигателя (при $p = 1$), равна 3000 об/мин.

При большем числе полюсов синхронная частота соответственно меньше:

p	1	2	3	4	5	5
n_1 , об/мин.....	3000	1500	1000	750	600	500

При необходимости получить частоту вращения больше 3000 об/мин можно применить либо двигатель постоянного тока, либо асинхронный двигатель, работающий от источника переменного тока повышенной частоты: 400, 500, 1000 Гц и более.

Ниже приведены значения наибольших синхронных частот вращения (при $p = 1$), соответствующие различным частотам переменного тока:

f_1 , Гц.....	50	100	200	400	500	1000
n_1 , об/мин....	3000	6000	12000	24000	30000	60000

4.4. ЭДС, индуцируемые в обмотках машин переменного тока

При конструировании машин переменного тока стремятся к тому, чтобы индуцируемые в обмотках ЭДС были синусоидальными. Если ЭДС индуцируются вращающимся магнитным полем, то для этого необходимо, чтобы распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора было также синусоидальным.

Получение вполне синусоидального распределения магнитного поля практически невозможно, однако для приближения к этой цели применяются различные меры конструктивного характера. Например, для улучшения кривой поля возбуждения явнополюсных синхронных генераторов их полюсные наконечники (рис. 4.6) обычно выполняют с радиусом, несколько меньшим, чем радиус воздушного зазора, в результате чего зазор у края наконечника (δ_m) больше, чем по его середине (δ). На практике $\delta_m/\delta = 1 \dots 2$ и коэффициент полюсного перекрытия $\alpha = b_p/\tau = 0,60 \dots 0,75$. Тем не менее и в этом случае кривая поля наряду с основной гармоникой ($v = 1$) содержит другие нечетные гармоники ($v = 3, 5, 7 \dots$), амплитуды которых уменьшаются с увеличением их порядка v .

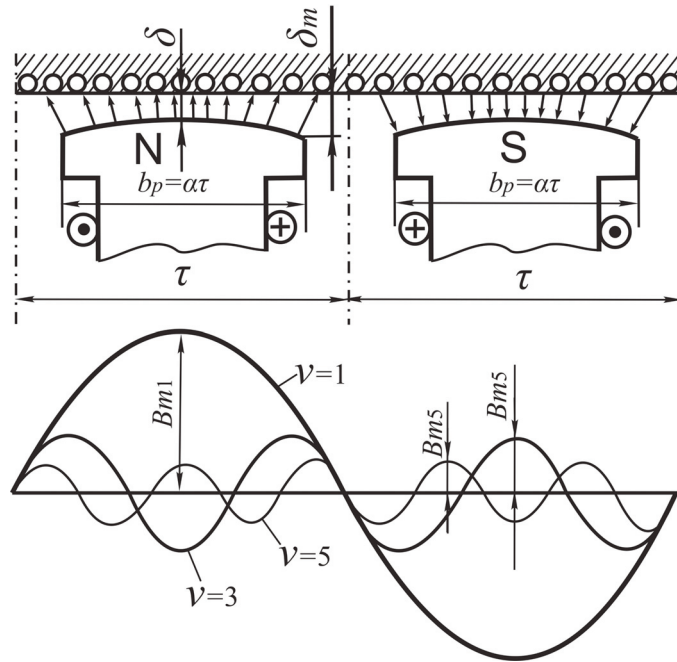


Рис. 4.6. Распределение магнитной индукции поля возбуждения явнополюсной синхронной машины вдоль поверхности статора

ЭДС проводника. Вращающееся со скоростью $\nu = 2\pi f$ синусоидальное магнитное поле индуцирует в каждом проводнике витка ЭДС

$$e_{\text{пр}} = E_m \sin \omega t,$$

амплитуда которой

$$E_m = B_\delta l_\delta \nu = 2f B_\delta l_\delta \tau$$

и действующее значение

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f B_\delta l_\delta \tau,$$

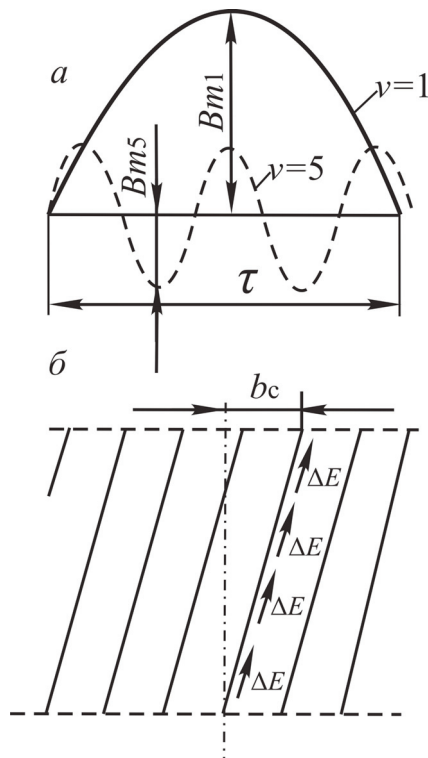


Рис. 4.7. ЭДС проводника при скосе пазов

где l_δ – расчетная активная длина машины и $B_\delta = B_{m1}$ – амплитуда индукции основной гармоники поля в зазоре.

В ряде случаев как в синхронных, так и в асинхронных машинах для улучшения формы кривой ЭДС обмотки осуществляется скос пазов относительно бегущего магнитного поля. Например, в явнополюсных синхронных машинах небольшой мощности иногда выполняют скос пазов статора относительно полюсных наконеч-

ников ротора или наоборот. При этом фазы ЭДС, индуцируемых в отдельных участках проводника (рис. 4.7 б) синусоидально распределенным магнитным полем (рис. 4.7, а), непрерывно изменяются вдоль проводника и элементарные ЭДС ΔE , индуцируемые на обоих концах проводника, сдвинуты по фазе на угол

$$\gamma_c = \frac{b_c}{\tau} \pi,$$

где b_c – величина скоса.

В этом случае для определения ЭДС проводника $E_{пр}$ необходимо сложить векторы ЭДС отдельных участков проводника $\Delta \dot{E}$ (рис. 4.8). В пределе, если рассматривать бесконечно малые участки проводников, $\Delta \dot{E} \rightarrow 0$ и геометрическая сумма $E_{пр}$ векторов $\Delta \dot{E}$ изобразится дугой и будет равна хорде окружности, опиравшейся на центральный угол γ_c .

При отсутствии скоса $\Delta \dot{E}$ складываются арифметически и их сумма равна длине дуги на рис. 4.8. Отношение длины хорды на рис. 4.8 к ее дуге

$$k_c = \frac{2R \sin \frac{\gamma_c}{2}}{R \gamma_c} = \frac{\sin \frac{\gamma_c}{2}}{\gamma_c / 2}$$

определяет степень уменьшения ЭДС $E_{пр}$ при наличии скоса и называется коэффициентом скоса пазов обмотки. Подставив сюда приведенное выше значение угла γ_c , получим

$$k_c = \frac{\sin \left(\frac{b_c \pi}{\tau 2} \right)}{\frac{b_c \pi}{\tau 2}}. \quad (4.2)$$

Очевидно, что при $b_c \rightarrow 0$ будет $k_c = 1$.

Таким образом, в общем случае правую часть выражения (4.2) нужно умножить на k_c и, следовательно,

$$E_{пр} = \sqrt{2} f B_{\delta} l_{\delta} \tau k_c. \quad (4.3)$$

Обычно скос относительно невелик и значение k_c близко к единице. Например, при $b_c / \tau = 1/6$:

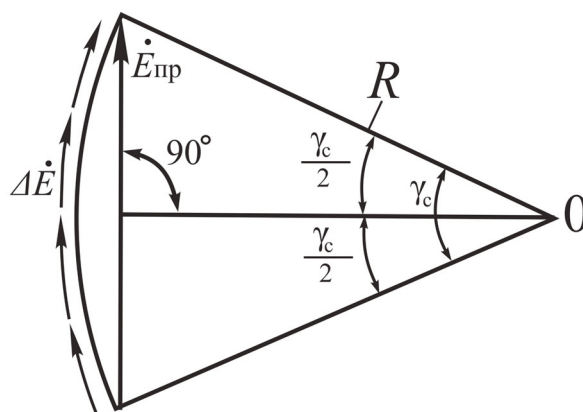


Рис. 4.8. Определение ЭДС проводника при наличии скоса пазов

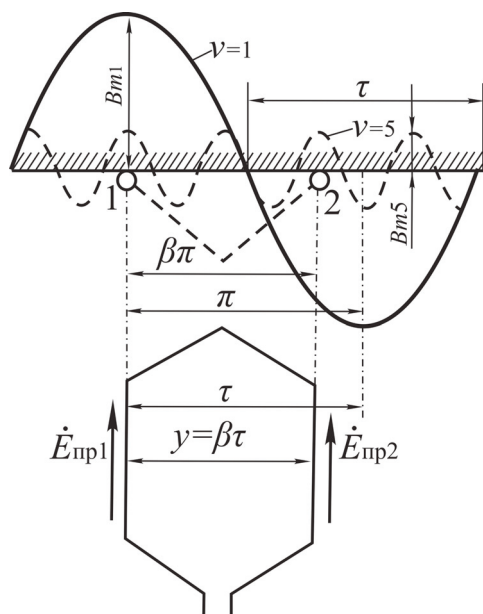


Рис. 4.9. ЭДС проводников витка

$$k_c = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 6}\right)}{\frac{\pi}{2 \cdot 6}} = \frac{12}{\pi} \cdot 0,259 = 0,989,$$

т. е. ЭДС $E_{пр}$ уменьшается на 1,1 %.

ЭДС витка и катушки. ЭДС двух активных сторон витка $E_{пр1}$ и $E_{пр2}$ (рис. 4.9) имеют одинаковую величину, но сдвинуты по фазе на угол $\beta\pi$ (рис. 4.10), так как активные проводники витка сдвинуты в магнитном поле на такой угол. ЭДС витка равна геометрической разности ЭДС проводников:

$$\dot{E}_в = \dot{E}_{пр1} - \dot{E}_{пр2}$$

и, согласно рис. 4.10,

$$E_в = 2E_{пр} \sin \frac{\beta\pi}{2}. \quad (4.4)$$

Входящая в выражение (4.4) величина

$$k_y = \sin \frac{\beta\pi}{2}. \quad (4.5)$$

равна отношению геометрической суммы ЭДС проводников витка $E_в$ к их арифметической сумме $2E_{пр}$, учитывает уменьшение ЭДС витка в результате укорочения шага и называется коэффициентом укорочения шага обмотки.

Очевидно, что величина $E_в$ максимальна при полном шаге ($y = \tau, \beta = 1$), когда $k_y = 1$.

Равенства (4.4) и (4.5) действительны также и при удлиненном шаге ($y > \tau, \beta > 1$).

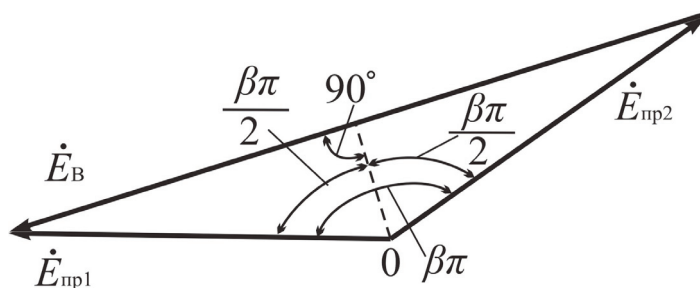


Рис. 4.10. Определение ЭДС витка

Если катушка содержит w_k витков, то ЭДС катушки

$$E_k = w_k E_B;$$

На основе выражений (4.3), (4.4) и (4.5)

$$E_k = 2\sqrt{2} f w_k k_y k_c B_\delta l_\delta \tau. \quad (4.6)$$

Поток одного полюса при синусоидальном распределении индукции

$$\Phi = B_{\text{cp}} l_\delta \tau = \frac{2}{\pi} B_\delta l_\delta \tau.$$

Подставив значение $B_\delta l_\delta \tau$ из этого выражения в (4.6), получим окончательно

$$E_k = \pi\sqrt{2} f w_k k_y k_c \Phi = 4,44 f w_k k_y k_c \Phi. \quad (4.7)$$

ЭДС катушечной группы. На рис. 4.4 и 4.5 были представлены обмотки простейшего вида, когда на каждую фазу под одним полюсом имеется только один паз.

Обычно для получения достаточного числа проводников и витков в фазе и сохранения в то же время приемлемых размеров пазов число пазов в машине делают больше. При этом ряд (q) катушек, имеющих по одинаковому количеству витков w_k и лежащих в соседних пазах, соединяют последовательно (рис. 4.11, где $q = 4$). Как было сказано выше, такую группу катушек, принадлежащих одной фазе, называют катушечной группой. ЭДС соседних катушек группы сдвинуты на угол

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z}$$

соответственно сдвигу катушек относительно друг друга в магнитном поле (рис. 4.12). При этом вся группа из q катушек образует фазную зону с углом

$$\alpha = q\gamma = 2\pi pq/z.$$

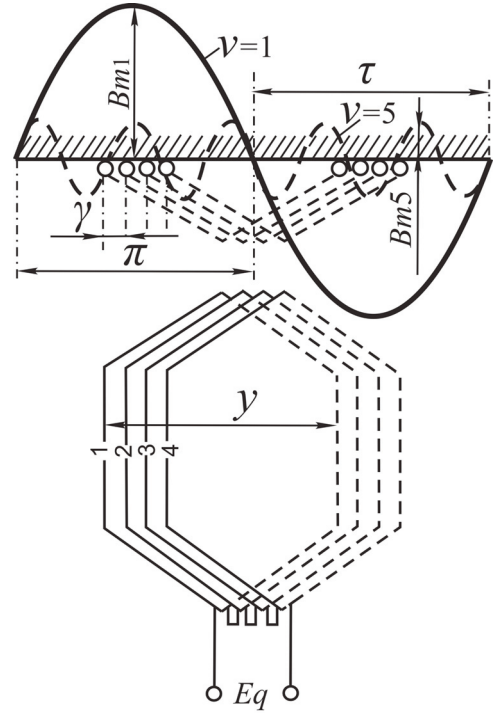


Рис. 4.11. Катушечная группа в магнитном поле

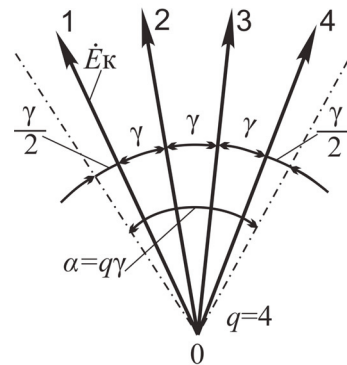


Рис. 4.12. ЭДС катушек катушечной группы

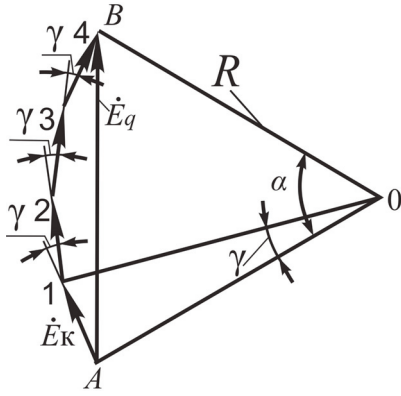


Рис. 4.13. Определение ЭДС катушечной группы

называется коэффициентом распределения обмотки и характеризует уменьшение ЭДС катушечной группы вследствие распределения ее витков qw_k в q отдельных пазах.

Таким образом, согласно выражению (4.8),

$$E_q = qE_k k_p. \quad (4.9)$$

Вокруг фигуры (см. рис 4.13), образованной векторами $\dot{E}_k$, можно описать окружность радиусом R . Тогда на основании этого рисунка

$$E_q = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

и

$$E_k = 2R \sin \frac{\gamma}{2} = 2R \sin \frac{\alpha}{2q}.$$

Подставив эти значения E_q и E_k в (4.8), получим формулу для вычисления k_p :

$$k_p = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2q}}. \quad (4.10)$$

Очевидно, что при $q = 1$ имеем $k_p = 1$, а при $q > 1$ будет $k_p < 1$.

Если в пределах угла фазной зоны α величину q увеличить, переходя ко все более мелким пазам, то в идеализированном предельном случае, когда $q = \infty$, получим так называемую равномерно распределенную обмотку. Для такой обмотки, заменив в знаменателе (4.10) в связи с малостью угла синус его аргументом, получим

$$k_{p\infty} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2q}}. \quad (4.11)$$

При $q = \infty$ ломаная линия AB на рис. 4.13 превращается в дугу AB описанной окружности, так как $E_k \rightarrow 0$. Отсюда следует, что выражение (4.11) вытекает также из рис. 4.13 как отношение хорды AB к дуге AB .

При заданном угле α величина $k_{p\infty}$ является наименьшим значением k_p .

В реальных случаях при $1 \leq q < \infty$ будет $1 \geq k_p > k_{p\infty}$.

На основании выражений (4.7) и (4.9)

$$E_q = \pi \sqrt{2} f q w_k k_{об} k_c \Phi, \quad (4.12)$$

где величина

$$k_{об} = k_v k_p$$

учитывает укорочение шага и распределение обмотки и называется обмоточным коэффициентом. Величину k_c также можно было бы ввести в качестве множителя в выражение для $k_{об}$. Однако обычно этого не делают, так как скос влияет на величину ЭДС лишь в том случае, когда пазы и проводники обмотки скошены относительно магнитного поля. Иногда же магнитное поле ориентировано вдоль скошенных пазов, и в этом случае скос на значение ЭДС не влияет.

ЭДС фазы обмотки. В многополюсной машине каждая фаза обмотки содержит ряд катушечных групп, лежащих под разными полюсами. В наиболее распространенном случае все группы содержат одинаковое число катушек q , занимают поэтому одинаковые углы α и сдвинуты относительно друг друга на целое число полюсных делений. В этом случае ЭДС всех катушечных групп равны по значению и сдвинуты по фазе на 360° (при сдвиге групп на четное число τ) или на 180° (при сдвиге на нечетное число τ). Такие катушечные группы можно соединить последовательно таким образом, что ЭДС групп будут складываться арифметически. Возможно также их параллельное и смешанное соединение так, что ЭДС всех параллельных ветвей будут одинаковы по значению и совпадут по фазе. Если в каждой ветви соединено последовательно n катушечных групп, то действующее значение ЭДС каждой ветви и фазы обмотки в целом будет

$$E = n E_q$$

или на основании выражения (4.12)

$$E = \pi \sqrt{2} f w k_{об} k_c \Phi = 4,44 f w k_{об} k_c \Phi. \quad (4.13)$$

Здесь

$$w = nqw_k$$

представляет собой число последовательно соединенных витков каждой параллельной ветви и называется числом витков фазы.

Если m -фазная обмотка заполняет все Z пазов и имеет a параллельных ветвей, то

$$w = \frac{Zs_{\pi}}{2am},$$

где s_{π} – число эффективных проводников в пазу. Эффективный проводник может состоять из одного или некоторого числа параллельных проводников.

В более сложных случаях, когда отдельные катушечные группы состоят из различного числа катушек, также применима формула (4.13), если рассчитывать соответствующим образом коэффициент распределения обмотки k_p .

В выражении (4.13) множитель $k_{об}k_c$ при $b_c \neq 0$, $\beta \neq 1$ и $q > 1$ меньше единицы. Это объясняется тем, что при $b_c \neq 0$, $\beta \neq 1$ поток полюса сцепляется с катушкой не полностью и при $q > 1$ в каждый момент времени потокосцепление различных катушек различно. Величина $wk_{об}$ называется также эффективным числом витков обмотки.

Так как

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega\Psi_m}{\sqrt{2}},$$

то из сопоставления этого выражения с равенством (4.13) следует, что амплитуда потокосцепления фазы обмотки

$$\Psi_m = wk_{об}k_c\Phi.$$

ЭДС обмотки от высших гармоник магнитного поля. Полученные выше выражения нетрудно распространить на ЭДС E_v , индуцируемую в обмотке высшей пространственной гармоникой магнитного поля (см. рис. 4.6). Действительно, полюсное деление v -гармоники τ_v в v раз меньше τ , и поэтому, если сдвиг двух проводников витка относительно основной гармоники ($v = 1$) составляет угол $\beta\pi$, то относительно v -й гармоники этот сдвиг равен $v\beta\pi$ (см. рис. 4.9). В результате при определении коэффициента укорочения для v -й гармоники вместо выражения (4.5) надо пользоваться равенством

$$k_{yv} = \sin \frac{v\beta\pi}{2}.$$

Сдвиг фаз ЭДС соседних катушек группы также будет в ν раз больше (см. рис. 4.11, 4.12 и 4.13), и поэтому коэффициент распределения вычисляется по формуле

$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{\nu \alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha}{2q}}.$$

Угол скоса паза относительно поля ν -й гармоники (см. рис. 4.7) также будет в ν раз больше, и поэтому

$$k_{cv} = \frac{\sin \left(\frac{\nu b_c}{\tau} \frac{\pi}{2} \right)}{\frac{\nu b_c}{\tau} \frac{\pi}{2}}.$$

Обмоточный коэффициент для высшей гармоники

$$k_{об\nu} = k_{yv} k_{pv}.$$

Отдельные сомножители $k_{об\nu}$, k_{cv} и произведение $k_{об\nu} k_{cv}$ в целом при вычислениях по приведенным формулам могут получиться отрицательными. Это будет означать поворот фазы E_ν на 180° по сравнению со случаем, когда произведение $k_{об\nu} k_{cv}$ положительно.

ЭДС фазы от высшей гармоники поля

$$E_\nu = \pi \sqrt{2} f_\nu w k_{об\nu} k_{cv} \Phi_\nu.$$

При этом поток ν -й гармоники определяется

$$\Phi_\nu = \frac{2}{\pi} B_{\delta\nu} l_\delta \tau_\nu = \frac{2}{\pi \nu} B_{\delta\nu} l_\delta \tau.$$

Здесь принято во внимание, что полюсное деление для ν -й гармоники τ_ν в раз меньше полюсного деления основной гармоники.

Частота ЭДС от высшей гармоники поля f_ν зависит от скорости вращения этой гармоники. Например, все гармоники поля возбуждения синхронной машины (см. рис. 4.6) вращаются со скоростью вращения полюсов, т. е. с одинаковой скоростью. Однако число полюсов ν -й гармоники в ν раз больше, и поэтому в данном случае $f_\nu = \nu f$, т. е. высшие гармоники поля индуцируют ЭДС высших частот или высшие гармоники ЭДС. Если ЭДС от различных гармоник поля имеют различные частоты, то действующее значение суммарной, или полной, ЭДС:

$$E_\Sigma = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_\nu^2 + \dots}$$

5. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

5.1. Устройство трехфазных асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающегося ротора. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора – вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками.

Существует два основных типа асинхронных двигателей: двигатели с короткозамкнутым ротором (рис. 5.1) и двигатели с фазным ротором (рис. 5.2). Последние иногда называют двигатели с контактными кольцами. Оба типа двигателей имеют одинаковую конструкцию статора и различаются устройством ротора.

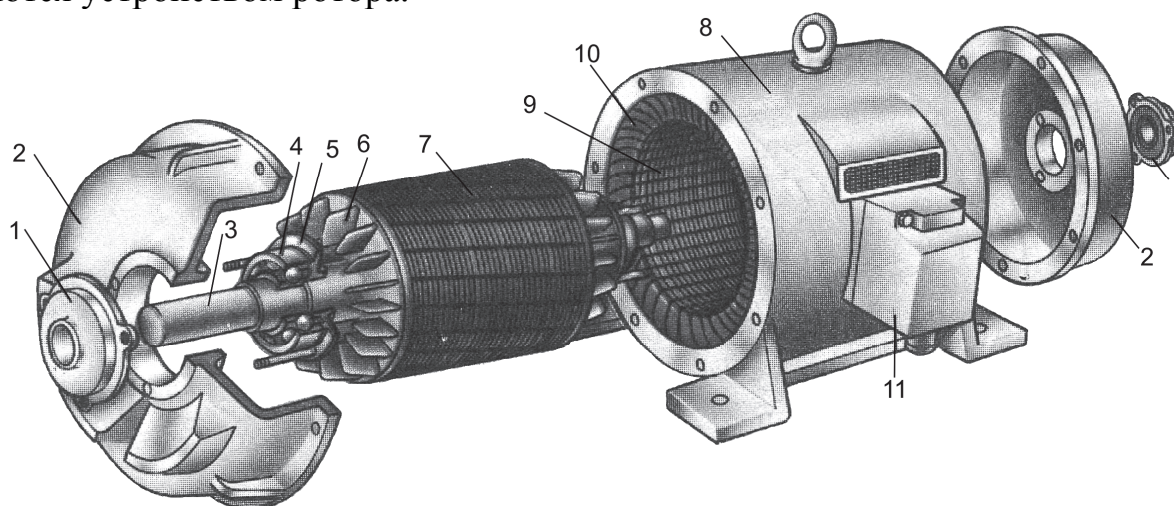


Рис. 5.1. Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
1 – крышка; 2 – подшипниковые щиты; 3 – вал; 4 – подшипник; 5 – крышка подшипника;
6 – вентиляционные лопасти; 7 – сердечник ротора; 8 – корпус; 9 – сердечник статора;
10 – обмотка статора; 11 – коробка выводов

Статор асинхронного двигателя состоит из корпуса, сердечника и обмотки.

Сердечник статора собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, которые до сборки покрывают с обеих сторон изоляционной пленкой (обычно лаком), чем ограничивают величину вихревых токов в сердечнике. На внутренней поверхности сердечника статора имеются пазы, в которых уложена обмотка статора.

Обычно к зажимам коробки выводов присоединяют шесть концов трехфазной обмотки. Это дает возможность применять одни и те же двигатели на различные напряжения сети, находящиеся в отношении $\sqrt{3}$, при

этом соединению звездой соответствует высшее напряжение. Для упрощения указанных переключений зажимы обмотки статора располагают в порядке, приведенном на рис. 5.3.

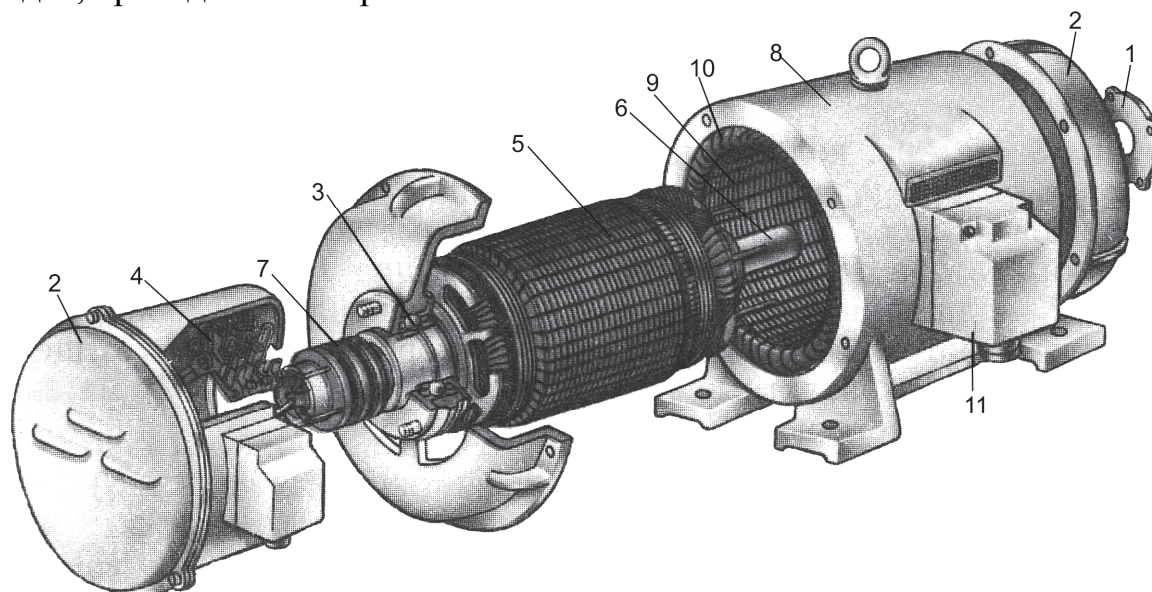


Рис. 5.2. Устройство асинхронного двигателя с фазным ротором:
1 – крышка; 2 – подшипниковые щиты; 3 – подшипник; 4 – щеткодержатели;
5 – сердечник ротора с обмоткой; 6 – вал; 7 – контактные кольца; 8 – корпус;
9 – сердечник статора; 10 – обмотка; 11 – коробка выводов

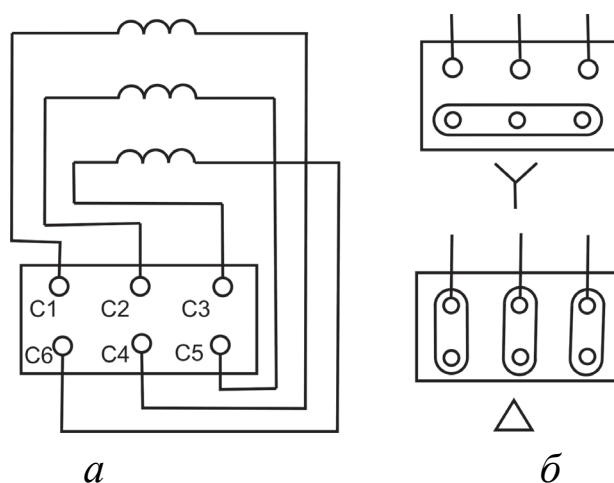


Рис. 5.3. Расположение выводов обмотки статора (а) и положение перемычек при соединении обмоток статора звездой и треугольником (б)

Концы фазных обмоток выводятся на зажимы коробки выводов и обозначаются по стандарту (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Обозначение выводов статорной обмотки

Фаза	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Первая	С 1	С 4
Вторая	С 2	С 5
Третья	С 3	С 6

Корпус статора служит для крепления сердечника с обмоткой и подшипниковых щитов. Основной магнитный поток статора замыкается по сердечнику, поэтому корпус можно сделать из немагнитных материалов. В небольших двигателях корпус отливают из алюминиевого сплава, стали или чугуна, а в крупных машинах делают сварным.

Ротор асинхронного двигателя состоит из вала, сердечника и обмотки.

Сердечник ротора имеет цилиндрическую форму, его собирают из листов электротехнической стали. В двигателях с короткозамкнутым ротором мощностью более 400 кВт обмотка ротора представляет собой ряд

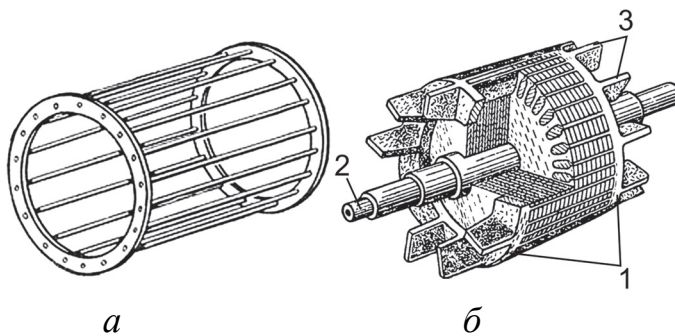


Рис. 5.4. Короткозамкнутый ротор:
а – обмотка «белочья клетка»; *б* – ротор с литой обмоткой; 1 – короткозамыкающие кольца; 2 – вал; 3 – вентиляционные лопатки

алюминиевых стержней, расположенных в пазах сердечника ротора и замкнутых по торцам кольцами (рис. 5.4, *а*). В двигателях мощностью до 400 кВт обмотку ротора выполняют заливкой пазов ротора под давлением расплавленным алюминием. При этом одновременно отливают и короткозамыкающие кольца вместе с вентиляционными лопатками (рис. 5.4, *б*).

Обмотку фазного ротора выполняют трехфазной, аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее три конца присоединяют к трем контактными кольцам, изолированным друг от друга. Для осуществления контакта с обмоткой вращающегося ротора на каждое контактное кольцо накладывают обычно две щетки, располагаемые в щеткодержателях. С помощью контактных колец и щеток обмотка ротора соединяется с пусковыми или регулировочными реостатами, т. е. в каждую фазу ротора вводится добавочное активное сопротивление.

Пусковые реостаты предназначены для уменьшения пусковых токов. При помощи регулировочных реостатов осуществляется регулирование частоты вращения.

Вал двигателя вращается в подшипниках, укрепленных в подшипниковых щитах-крышках.

Для уменьшения потерь и износа щеток некоторые двигатели с фазным ротором средней и большой мощности снабжаются специальным механизмом, позволяющим после пуска двигателя поднимать щетки и исключать из работы пусковые реостаты путем замыкания накоротко контактных колец.

На корпусе двигателя укреплена табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска, а также номинальные данные двигателя (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

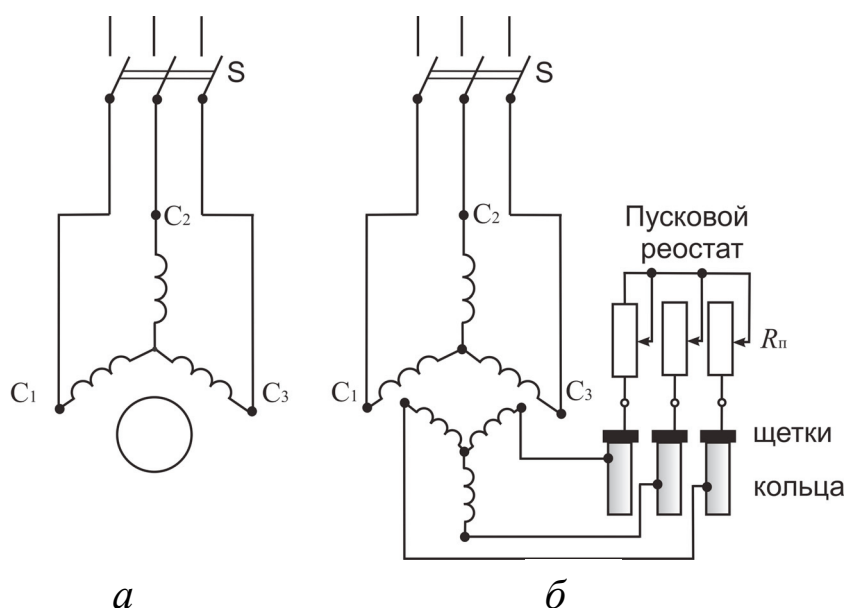


Рис. 5.5. Принципиальные схемы асинхронных двигателей:

а — с короткозамкнутым ротором; *б* — с фазным ротором

Принципиальные схемы асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором приведены на рис. 5.5, *а* и *б*.

5.2. Принцип действия асинхронной машины

Магнитный поток Φ_1 , создаваемый обмоткой статора (см. рис. 4.4 и 4.5), при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора, индуцирует в них ЭДС и если обмотка ротора замкнута, то в ней возникают токи i_2 , частота которых f_2 при неподвижном роторе ($n = 0$) равна первичной частоте f_1 .

Если обмотка ротора является трехфазной, то в ней индуцируется трехфазных ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора Φ_2 , число полюсов $2p$, направление и скорость вращения которого при $n = 0$

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1$$

такие же, как и у потока статора. Поэтому потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя Φ . При короткозамкнутом роторе в его стержнях индуцируется многофазная система токов i_2 со сдвигом в соседних стержнях по фазе на угол

$$\gamma = \frac{2\pi p}{Z_2},$$

где Z_2 – число стержней ротора. Эти токи также создают вращающийся поток Φ_2 , число полюсов, направление и скорость вращения которого являются такими же, как и у потока фазного ротора. Поэтому и в данном случае в двигателе образуется общий магнитный поток Φ . Ввиду существования общего вращающегося магнитного поля можно рассматривать ЭДС, индуцируемые в обмотках этим полем.

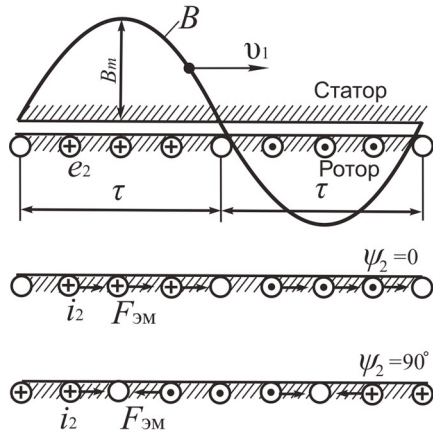


Рис. 5.6. Токи в стержнях обмотки ротора и действующие на них силы

В результате взаимодействия токов ротора с потоком возникают действующие на проводники ротора электромагнитные силы $F_{эм}$ и вращающий электромагнитный момент $M_{эм}$. В дальнейшем индекс «эм» у $M_{эм}$ будем опускать.

В верхней части рис. 5.6 показаны вращающаяся со скоростью v_1 синусоидальная волна общего магнитного поля B машины и направления ЭДС e_2 , индуцируемых этим полем в стержнях неподвижного короткозамкнутого ротора

с диаметром D_2 . В нижней части рис. 5.6 показаны направления токов стержней i_2 и действующих на них сил $F_{эм}$ для двух случаев: когда угол сдвига фаз ψ_2 между e_2 и i_2 равен нулю и когда $\psi_2 = 90^\circ$. При $\psi_2 = 0$ все силы действуют в сторону вращения поля. Поэтому вращающий момент

$$M = \sum_{Z_2} \frac{F_{эм} D_2}{2}$$

отличен от нуля и также действует в сторону вращения поля. В то же время при $\psi_2 = 90^\circ$ силы действуют в разные стороны и $M = 0$.

Отсюда следует, что вращающий момент создается только активной составляющей тока ротора

$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2.$$

Этот вывод имеет общий характер и справедлив также для других видов машин переменного тока.

Цепь ротора асинхронного двигателя всегда обладает определенным активным сопротивлением, и поэтому при пуске двигателя ($n = 0$) всегда $0 < \psi_2 < 90^\circ$. В результате развиваемый момент $M > 0$, и если он больше статического тормозного момента на валу, то ротор двигателя придет во вращение в направлении вращения поля, с некоторой скоростью $n < n_1$, т.е. будет вращаться с некоторым отставанием, или скольжением, относительно поля статора.

Относительная разность скоростей вращения поля и ротора

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (5.1)$$

называется скольжением. Скольжение иногда выражают в процентах:

$$s\% = 100s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100.$$

Скорость ротора n , выраженная через скольжение s , согласно (5.1), равна

$$n = (1 - s)n_1. \quad (5.2)$$

При пуске двигателя ($n = 0$) имеем $s = 1$, а при вращении ротора синхронного с полем статора или, как говорят, с синхронной скоростью ($n = n_1$) будет $s = 0$. При $n = n_1$ магнитное поле статора относительно ротора неподвижно и токи в роторе индуцироваться не будут, поэтому $M = 0$ и такой скорости вращения двигатель достичь не может. Вследствие этого в режиме двигателя всегда $0 < n < n_1$ и $1 > s > 0$.

При вращении ротора в сторону поля частота пересечения полем проводников ротора пропорциональна разности скоростей $n_1 - n$ и частота тока в обмотке ротора

$$f_2 = p(n_1 - n). \quad (5.3)$$

Подставив сюда значение n из (5.2) и затем значение n_1 из (4.3), получим

$$f_2 = spn_1 = sf_1, \quad (5.4)$$

т. е. вторичная частота пропорциональна скольжению.

При частоте тока $f_2 < f_1$ скорость вращения поля ротора относительно самого ротора n_{2p} также меньше n_1 и на основании выражения (5.4)

$$n_{2p} = f_2/p = sn_1. \quad (5.5)$$

Скорость вращения поля ротора относительно статора в соответствии с (5.2) и (5.5)

$$n_{2c} = n + n_{2p} = (1 - s) n_1 + sn_1 = n_1, \quad (5.6)$$

т.е. скорость вращения поля ротора относительно статора при любой скорости вращения ротора n равна скорости вращения поля статора n_1 . Поэтому поля статора и ротора при вращающемся роторе также вращаются всегда синхронно и образуют общее вращающееся поле.

Представленная на рис. 5.6 картина направлений токов и механических сил действительна и при вращении ротора, когда $0 < n < n_1$ (двигательный режим).

Если ротор асинхронной машины с помощью внешней силы (вращающего момента) привести во вращение в направлении вращения поля статора со скоростью выше синхронной ($n > n_1$), то ротор будет обгонять поле и направления индуцируемых в обмотке ротора токов по сравнению с изображенными на рис. 5.6 изменяются на обратные. При этом изменяются на обратные также направления электромагнитных сил $F_{эм}$ и электромагнитного момента M . Момент M при этом будет тормозящим, а машина будет работать в режиме генератора и отдавать активную мощность в сеть. Согласно выражению (5.1), в режиме генератора $s < 0$.

Если ротор вращать в направлении, обратном направлению вращения поля статора ($n < 0$), то указанные на рис. 5.6 направления e_2 , i_2 и $F_{эм}$ сохраняются. Электромагнитный момент M будет действовать в направлении вращения поля статора, но будет тормозить вращение ротора. Этот режим работы асинхронной машины называется режимом противовключения или режимом электромагнитного тормоза. В этом режиме в соответствии с выражением (5.1) $s > 1$.

5.3. Работа асинхронной машины при заторможенном роторе

Режимы работы машины при заторможенном роторе наиболее просты для исследования, так как при этом обмотки статора и ротора пересекаются магнитным потоком с одной и той же скоростью, т. е. частоты ЭДС статора f_1 и ротора f_2 равны между собой. Если считать, что вращающееся магнитное поле близко к круговому и, кроме того, высшие гармоники ЭДС подавляются из-за распределения обмоток в нескольких пазов и укорочения шага, то при анализе электромагнитных процессов можно учитывать только первые гармоники, ЭДС статора и ротора (скос пазов не учитываем) определяется равенством (4.16) соответственно:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f_1 w_1 k_{\sigma 1} \Phi_m; \\ E_2 &= 4,44 f_1 w_2 k_{\sigma 2} \Phi_m, \end{aligned} \quad (5.7)$$

где w_1 и $k_{\sigma 1}$ – число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора; w_2 и $k_{\sigma 2}$ – число витков и обмоточный коэффициент обмотки ротора.

Если обмотка ротора разомкнута, то по ней не проходит ток и, следовательно, она не влияет на электромагнитные процессы в статоре. При работе машины в рассматриваемом режиме для каждой фазы обмотки статора можно написать уравнение при холостом ходе:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_0 R_1, \quad (5.8)$$

где U_1 – приложенное к обмотке напряжение; E_1 – ЭДС, индуцируемая вращающимся магнитным потоком Φ , охватывающим обмотки ротора и статора; $E_{\sigma 1} = 4,44 f_1 w_1 k_{\sigma 1} \Phi_{\sigma 1}$ – ЭДС, вызываемая потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ обмотки статора; $I_0 R_1$ – падение напряжения в активном сопротивлении обмотки статора от тока I_0 , который можно рассматривать как ток холостого хода асинхронной машины при идеализированных условиях (когда ток в обмотке ротора равен нулю).

На рис. 5.7, а показана векторная диаграмма асинхронной машины при работе ее в рассматриваемом режиме в соответствии с (5.8), при этом вектор $\dot{E}_{\sigma 1}$ заменен противоположно направленным ему вектором $-j\dot{I}_0 X_1$, где X_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора от потока рассеяния. В принципе указанная диаграмма должна быть аналогична векторной диаграмме трансформатора при холостом ходе, так как в этих машинах в рассматриваемом режиме имеют место одинаковые электромагнитные процессы (обмотка статора аналогична первичной обмотке трансформатора, а обмотка ротора – вторичной обмотке).

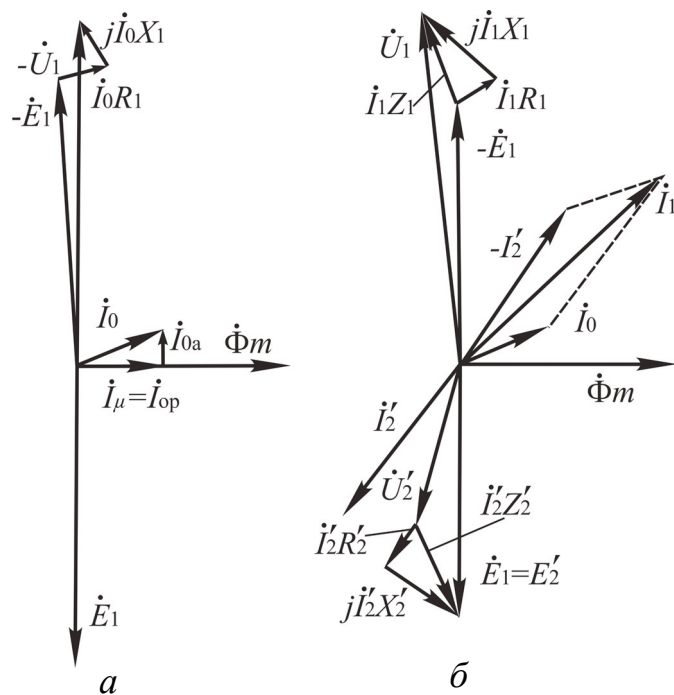


Рис. 5.7. Векторные диаграммы асинхронной машины при холостом ходе (а) и нагрузке (б)

Если в машине с заторможенным ротором в цепь обмотки ротора (вторичной обмотки) включить сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}$, то ее в принципе можно использовать в качестве трансформатора.

Векторная диаграмма асинхронной машины с заторможенным ротором (см. рис. 5.7, б) и ее схема замещения (рис. 5.8) определяются известными уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 + \dot{E}_1 &= \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1; \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' + j \dot{I}_2' X_2'; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'),\end{aligned}$$

где $\dot{U}_2'$, $\dot{E}_2'$, $\dot{I}_2'$ – значения напряжения, ЭДС и тока в обмотке ротора, приведенные к обмотке статора; R_2' , X_2' – приведенные значения активного и индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора; $Z_{\text{н}}'$ – приведенное значение сопротивления нагрузки; $\dot{I}_1$ – ток в обмотке статора при нагрузке.

Схема замещения. Для получения математического описания электромагнитных процессов в асинхронной машине, при заторможенном роторе и, в частности, для составления ее схемы замещения необходимо, аналогично, как это делается в теории трансформатора, заменить обмотку

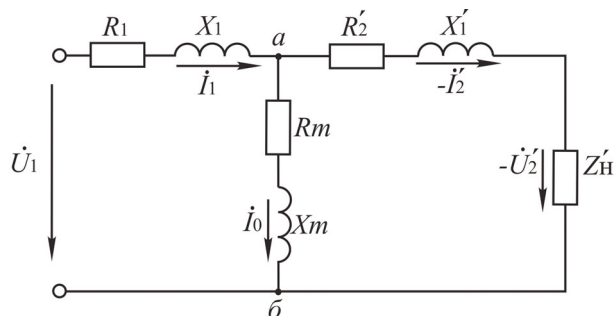


Рис. 5.8. Схема замещения асинхронной машины при заторможенном роторе

ротора с числом фаз m_2 и числом витков в фазе w_2 «приведенной обмоткой», имеющей то же число фаз m_1 и число витков w_1 , что и обмотка статора. Схема замещения рассматриваемой машины (рис. 5.8) аналогична схеме замещения трансформатора, но параметры ее определяются другими коэффициентами приведения. Она представляет собой сочетание двух схем замещения – обмотки статора и обмотки

ротора, которые соединены между собой в точках a и b . В цепи обмотки статора включены сопротивления R_1 и X_1 в цепи обмотки ротора – сопротивления R_2' и X_2' . Участок схемы замещения между точками a и b , по которому проходит ток холостого хода $\dot{I}_0'$, называют намагничивающим контуром. На вход схемы замещения подается напряжение $\dot{U}_1$, к выходу ее подключается сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}'$, к которому приложено напряжение $\dot{U}_2'$.

При составлении схемы замещения асинхронной машины принимается, что потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, создаваемые обмотками статора и ротора, совпадают по фазе с токами, протекающими по соответствующим обмоткам, и пропорциональны этим токам. Это допущение является вполне обоснованным, так как указанные магнитные потоки замыкаются главным образом по воздуху (поперек соответствующих пазов, через коронки зубцов и вокруг лобовых соединений). Поэтому можно считать, что при режимах, близких к номинальному, индуктивные сопротивления рассеяния $X_1 = E_{\sigma 1}/I_1$ и $X_2 = E_{\sigma 2}/I_2$ не зависят от величины тока в соответствующих обмотках.

Коэффициент приведения для ЭДС и напряжений k_u можно получить из (5.7)

$$k_u = E'_2/E_2 = E_1/E_2 = (w_1 k_{\sigma 1})/(w_2 k_{\sigma 2}).$$

При этом принимают, что магнитный поток Φ_m сохраняется неизменным.

Коэффициенты приведения тока и сопротивлений обмотки ротора к обмотке статора можно получить из условия равенства мощностей реального и приведенного роторов $m_2 I_2 E_2 = m_1 I'_2 E'_2$. При этом, заменяя $E_2/E'_2 = (w_2 k_{\sigma 2})/(w_1 k_{\sigma 1})$, находим

$$I'_2 = (m_2/m_1)/(E_2/E'_2) I_2 = (m_2 w_2 k_{\sigma 2})/(m_1 w_1 k_{\sigma 1}) I_2 = I_2/k_i.$$

Значения $k_i = (m_1 w_1 k_{\sigma 1})/(m_2 w_2 k_{\sigma 2})$ называют коэффициентом приведения токов.

Из равенства электрических потерь $m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I'^2_2 R'_2$ получаем

$$R'_2 = (m_2/m_1)(I_2/I'_2)^2 R_2 = k_i k_u R_2 = k_z R_2.$$

Из равенства относительных индуктивных падений напряжений (т.е. неизменности реактивной мощности) $I'_2 X_2/E_2 = I'_2 X'_2/E'_2$ находим

$$X'_2 = (E'_2/E_2)(I'_2/I_2) X_2 = k_i k_u X_2 = k_z X_2.$$

Значение $k_z = k_u k_i$ называют коэффициентом приведения сопротивлений.

Таким образом, при неподвижном роторе асинхронная машина работает как трансформатор, в котором электрическая энергия первичной цепи преобразуется в электрическую энергию вторичной цепи.

5.4. Работа асинхронной машины при вращающемся роторе

Рассмотрим общий случай индуцирования ЭДС в обмотке ротора, увлекаемого вращающимся магнитным потоком. Так как эта обмотка пересекается магнитным потоком с частотой $n_1 - n$, частота индуцируемой в ней ЭДС определяется в соответствии с (5.3)

$$f_2 = p(n_1 - n)/60.$$

Согласно уравнению (5.4)

$$f_2 = sf_1.$$

При вращении ротора ЭДС в обмотке ротора

$$E_{2s} = 4,44f_2w_2k_{об2}\Phi_m = 4,44f_1sw_2k_{об2}\Phi_m. \quad (5.9)$$

Учитывая, что эта ЭДС при заторможенном роторе $E_2 = 4,44f_1w_2k_{об2}\Phi_m$, получаем

$$E_{2s} = E_2s. \quad (5.10)$$

В соответствии с (5.6) поля статора и ротора вращаются с одинаковой частотой, т. е. относительно друг друга не подвижны.

Полученные ранее для заторможенного ротора выводы о взаимодействии токов в первичной и вторичной обмотках полностью остаются в силе и для вращающегося ротора. В двигательном режиме работы электрическая энергия, потребляемая первичной обмоткой из питающей сети, за вычетом потерь в машине преобразуется в механическую энергию на валу машины. В генераторном режиме, наоборот, механическая энергия, подводимая к валу, преобразуется в электрическую энергию в первичной обмотке и передается в сеть.

Энергетическая диаграмма. Процесс преобразования электрической энергии в механическую в асинхронной машине может быть описан уравнением баланса активной мощности. На основании закона сохранения энергии для двигательного режима работы можно записать:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{м1} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}, \quad (5.11)$$

где P_1 – электрическая мощность, потребляемая машиной из сети; P_2 – полезная механическая мощность; $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$ – потери мощности в обмотке статора и ротора; $\Delta P_{м1}$ – магнитные потери в пакете магнитопровода статора; $\Delta P_{мех}$ – механические потери; $\Delta P_{доб}$ – добавочные потери. Уравнение (5.11) наглядно иллюстрирует энергетическая диаграмма (рис. 5.9).

При работе машины в двигательном режиме к обмотке статора от источника питания, например от трехфазной сети, подводится мощность $P_1 = m_1 U I_1 \cos \varphi$. Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь $\Delta P_{эл1}$ в активном сопротивлении обмотки статора и магнитных потерь $\Delta P_{м1}$ в статоре. В обмотку ротора посредством вращающегося магнитного поля передается электромагнитная мощность

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{м1}.$$

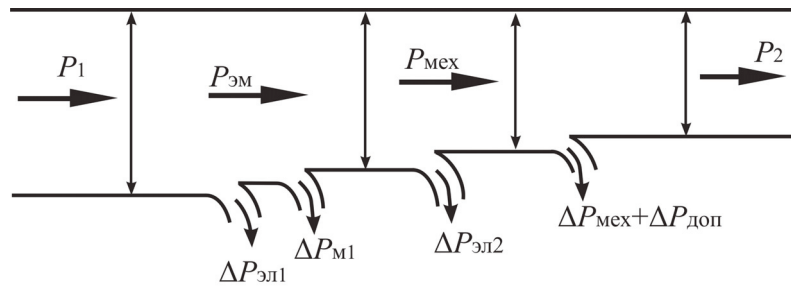


Рис. 5.9. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Часть электромагнитной мощности, полученной ротором, затрачивается на покрытие электрических потерь $\Delta P_{эл2}$ в его обмотке. В машинах с фазным ротором возникают еще потери в щеточных контактах на кольцах, которые обычно включаются в потери $\Delta P_{эл2}$. Оставшаяся часть мощности $P_{эм}$ превращается в механическую мощность

$$P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{эл2}.$$

Магнитные потери $\Delta P_{м2}$ в роторе из-за малой частоты перемагничивания практически отсутствуют. За вычетом незначительных потерь на трение $\Delta P_{мех}$ (механических) и добавочных потерь $\Delta P_{доб}$ механическая мощность двигателя отдается нагрузке и является выходной полезной мощностью

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}.$$

Выразим электромагнитную и механическую мощности через электромагнитный вращающий момент M :

$$\begin{aligned} P_{эм} &= \omega_1 M; \\ P_{мех} &= \omega_2 M, \end{aligned}$$

где $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ и $\omega_2 = 2\pi n/60$ — угловые скорости магнитного поля и ротора.

Из энергетической диаграммы (см. рис. 5.9) следует, что

$$\Delta P_{эл2} = P_{эм} - P_{мех},$$

или

$$\Delta P_{эл2} = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1(\omega_1 - \omega_2)/\omega_1 = M\omega_1 s. \quad (5.12)$$

Из формулы (5.12) имеем

$$M = \Delta P_{эл2} / (\omega_1 s); \quad (5.13)$$

$$s = \Delta P_{эл2} / M \omega_1 = \Delta P_{эл2} / P_{эм}. \quad (5.14)$$

Полученные формулы (5.13) и (5.14) позволяют произвести анализ важнейших свойств асинхронного двигателя, а именно: установить связь между скольжением и коэффициентом полезного действия, а также зависимость электромагнитного момента от параметров машины и режима ее работы.

Связь между скольжением и КПД. Представим коэффициент полезного действия асинхронного двигателя в виде

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_{эм} / P_1) \cdot (P_2 / P_{эм}) = \eta_1 \eta_2,$$

где η_1 и η_2 – КПД статора и ротора.

Поскольку

$$\eta_2 = P_2 / P_{эм} = (P_{эм} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}) / P_{эм},$$

справедливо неравенство

$$\eta_2 < (P_{эм} - \Delta P_{эл2}) / P_{эм} < 1 - \Delta P_{эл2} / P_{эм} < 1 - s.$$

Следовательно, $\eta < \eta_2 < 1 - s$.

Таким образом, для того чтобы асинхронный двигатель работал при номинальном режиме с высоким коэффициентом полезного действия, необходимо, чтобы в этом режиме он имел небольшое скольжение. Обычно в номинальном режиме $s_{ном} = 0,01 \dots 0,06$, при этом обмотку ротора выполняют с небольшим активным сопротивлением.

Номинальная частота вращения ротора

$$n_{ном} = n_1 (1 - s_{ном})$$

приблизительно может быть принята равной $n_{ном} \approx 0,97 n_1$.

Значения частоты n_1 и приближенные значения $n_{ном}$ для асинхронных двигателей общепромышленного применения при $f_1 = 50$ Гц в зависимости от числа полюсов $2p$ приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Значения частоты n_1 и приближенные значения $n_{ном}$

Частота вращения	Число полюсов			
	2	4	6	8
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750
$n_{ном}$, об/мин	2910	1450	970	730

Незначительное отклонение частоты вращения ротора от синхронной частоты вращения магнитного поля позволяет в технических документах указывать только величину синхронной частоты.

5.5. Схема замещения асинхронной машины

Определение токов, потерь мощности и падений напряжения в асинхронном двигателе осложняется тем, что в обмотке вращающегося ротора проходит ток, действующее значение и частота которого зависят от частоты вращения. Ток ротора

$$I_2 = E_{2s}/Z_2 = E_{2s}/\sqrt{R_2^2 + X_2^2}. \quad (5.15)$$

Поскольку ротор вращается, из (5.4) и (5.10) следует, что ЭДС E_{2s} в обмотке ротора и ее частота f_2 пропорциональны скольжению s . Следовательно, и индуктивное сопротивление обмотки ротора зависит от скольжения:

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 s = X_2 s,$$

где X_2 – индуктивное сопротивление обмотки заторможенного ротора; L_2 – ее индуктивность.

Подставляя значения E_{2s} и X_{2s} в (5.15), получим

$$I_2 = E_2 s / \sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}. \quad (5.16)$$

На рис. 5.10, а показана электрическая схема замещения ротора, соответствующая уравнению (5.16).

Так как в числителе и знаменателе (5.16) есть переменная величина s , преобразуем (5.16) к виду

$$I_2 = E_2 / \sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}. \quad (5.17)$$

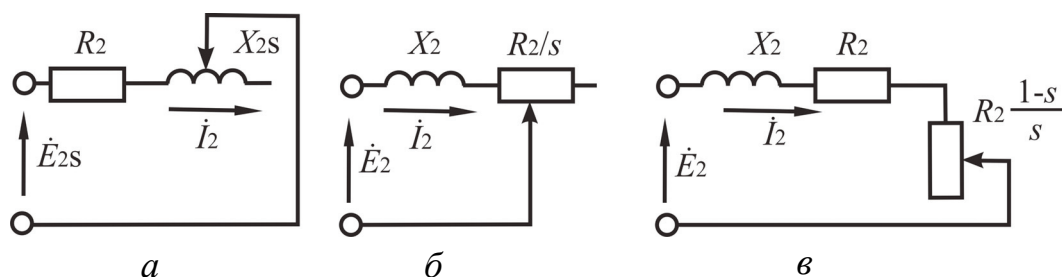


Рис. 5.10. Схемы замещения ротора асинхронной машины

Уравнению (5.17) соответствует электрическая схема замещения, изображенная на рис. 5.10, б. Здесь ЭДС E_2 и индуктивное сопротивление X_2 неизменны, а активное сопротивление R_2/s меняется в зависимости от

скольжения. Основные параметры этой схемы (индуктивное X_2 и активное R_2 сопротивления) такие же, как и в схеме замещения для заторможенного ротора.

Следует подчеркнуть, что схемы, представленные на рис. 5.10, а, б, с энергетической точки зрения не эквивалентны. Так, в схеме, приведенной на рис. 5.10, а, электрическая мощность равна электрическим потерям в контуре:

$$P_p = \Delta P_{эл2} = m_2 I_2^2 R_2.$$

Мощность, потребляемая в схеме, приведенной на рис. 5.10, б:

$$P'_p = m_2 I_2^2 R_2 / s.$$

Отношение этих мощностей

$$P_p / P'_p = m_2 I_2^2 R_2 / [(m_2 I_2^2 R_2) / s] = s.$$

Однако так как $s = \Delta P_{эл2} / P_{эм}$, получим, что $P'_p = P_{эм}$. Следовательно, электрическая мощность, P'_p в схеме, представленной на рис. 5.10, б, равна всей электромагнитной мощности, подводимой от статора к ротору.

По известным величинам $\Delta P_{эл2}$ и $P_{эм}$ легко определить и механическую мощность ротора:

$$P_{мех.} = P_{эм} - \Delta P_{эл2} = m_2 I_2^2 R_2 / s - m_2 I_2^2 R_2 = m_2 I_2^2 R_2 (1 - s) / s.$$

Полученный результат наглядно представлен электрической схемой, изображенной на рис. 5.10, в, в которой активное сопротивление обмотки ротора разбито на две части: R'_2 и $R'_2 (1 - s) / s$. Первое сопротивление не зависит от режима работы, и потери в нем равны электрическим потерям реального ротора. Второе сопротивление зависит от скольжения, и мощность, выделяющаяся в нем, численно равна механической мощности двигателя $P_{мех.}$. Таким образом, рассматриваемая схема замещения позволяет заменить реальный вращающийся ротор неподвижным, в цепь обмотки которого включено активное сопротивление, зависящее от частоты вращения ротора. По этим причинам указанное дополнительное сопротивление $R'_2 (1 - s) / s$ в литературе иногда обозначают $R_{мех.}$.

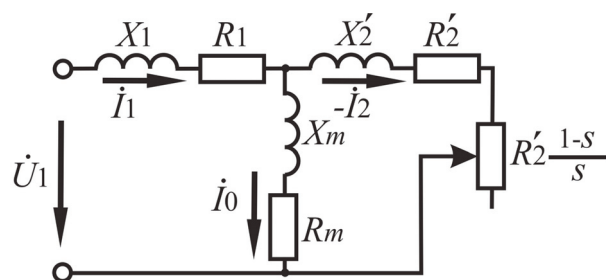


Рис. 5.11. Т-образная схема замещения асинхронной машины

того включено активное сопротивление, зависящее от частоты вращения ротора. По этим причинам указанное дополнительное сопротивление $R'_2 (1 - s) / s$ в литературе иногда обозначают $R_{мех.}$.

Т-образная схема замещения. Полная схема замещения асинхронного двигателя (рис. 5.11)

Схему замещения (см. рис. 5.11) называют Т-образной. Ей соответствуют следующие уравнения.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1. \quad (5.18)$$
$$\dot{E}_2' = \dot{E}_1' - \dot{I}_2' X_2' + \dot{I}_2' R_2'/s = \dot{I}_2' Z_2' + \dot{I}_2' R_2'(1-s)/s. \quad (5.19)$$
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (5.20)$$

Количественное различие между схемами замещения асинхронного двигателя и трансформатора обусловлено значительно большим током холостого хода асинхронного двигателя. Если в теории трансформатора часто можно пренебречь намагничивающим контуром, то при рассмотрении работы асинхронного двигателя этого сделать нельзя, так как ошибка может получиться значительной.

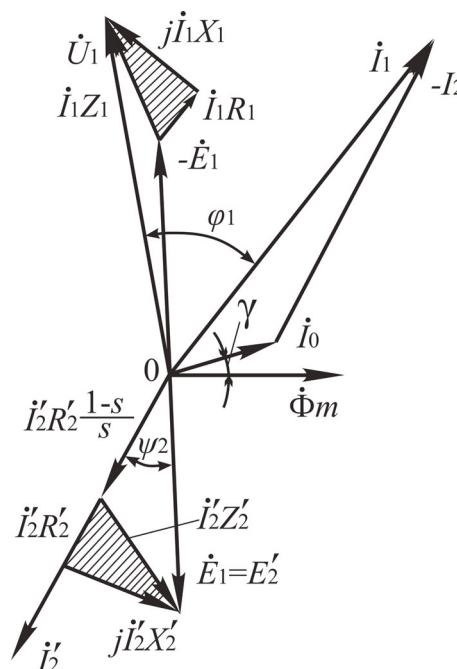


Рис. 5.12. Векторная диаграмма для Т-образной схемы замещения

$X_{1*} \approx X_{2*}' = 0,07 \dots 0,15$; $R_{1*} \approx R_{2*}' = 0,01 \dots 0,07$; $R_{m*} = 0,1 \dots 0,4$; (меньшие значения относятся к двигателям меньшей мощности). Векторная диаграмма для Т-образной схемы замещения приведена на рис. 5.12.

Из системы уравнений (5.18) – (5.20) можно получить следующие значения токов в обмотках статора и ротора:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m Z'_{2s} / (Z_m + Z'_{2s})} = \frac{\dot{U}_1 (Z_m + Z'_{2s})}{Z_1 Z_m + Z_1 Z'_{2s} + Z_m Z'_{2s}}; \quad (5.21)$$

$$-\dot{I}'_2 = \dot{I}_1 - \dot{I}_0 = \dot{I}_1 - \frac{\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1}{Z_m} = \frac{\dot{U}_1 Z_m}{Z_1 Z_m + Z_1 Z'_{2s} + Z_m Z'_{2s}}, \quad (5.22)$$

где $Z_1 = R_1 + jX_1$; $Z_m = R_m + jX_m$; $Z'_{2s} = R'_{2s}/s + jX'_2$.

Уравнения (5.21) и (5.22) можно преобразовать, положив $(Z_m + Z_1)/Z_m = \dot{C}_1$. При этом получим:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 (1 + Z'_{2s}/Z_m)}{Z_1 + \dot{C}_1 Z'_{2s}}; \quad -\dot{I}'_2 = \dot{U}_1 / (Z_1 + \dot{C}_1 Z'_{2s}).$$

Появившемуся при этом преобразовании комплексному коэффициенту $\dot{C}_1$ можно дать следующую физическую интерпретацию. При идеальном холостом ходе $\dot{I}_2 = 0$ и $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$. Следовательно, $\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (Z_1 + Z_m)$; $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m$, откуда

$$\dot{U}_1 / (-\dot{E}_1) = (Z_1 + Z_m) / Z_m = \dot{C}_1 = 1 + \frac{R_1 R_m + X_1 X_m}{R_1^2 + X_m^2} - j \frac{R_1 X_m - X_1 R_m}{R_1^2 + X_m^2}.$$

В асинхронных машинах обычно $X_m \gg R_m$ и $R_1 X_m > X_1 R_m$, вследствие чего мнимая часть $j(R_1 X_m - X_1 R_m)$ комплекса $\dot{C}_1$ отрицательна. Поэтому в показательной форме

$$\dot{C}_1 = C_1 e^{-j\gamma}$$

Таким образом, модуль $\dot{C}_1$ коэффициента $\dot{C}_1$ представляет собой отношение напряжения U_1 к ЭДС E_1 , индуцируемой в обмотке статора при идеальном холостом ходе, а аргумент $\gamma = \arctg \{(R_1 X_m - X_1 R_m) / [X_m (X_1 + X_m)]\}$ – угол между векторами $\dot{U}_1$ и $-\dot{E}_1$ (рис. 5.13).

В практических расчетах аргумент γ часто определяют по приближенной формуле

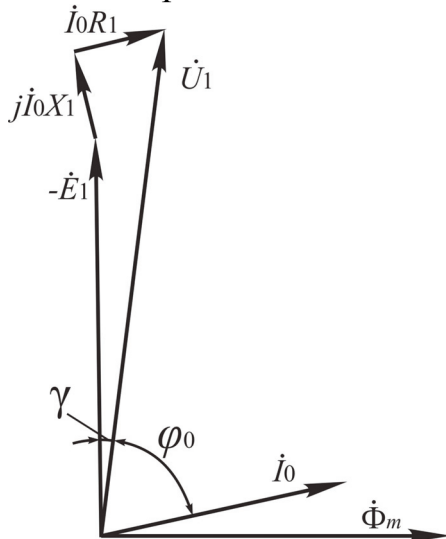


Рис. 5.13. Векторная диаграмма асинхронной машины при идеальном холостом ходе

$$\sin 2\gamma \approx 2I_0 R_1 / U_1.$$

Рассмотрение теории работы асинхронной машины можно упростить, преобразовав Т-образную схему замещения в Г-образную (рис. 5.14, а). В этой схеме намагничивающий контур вынесен к входным зажимам, к которым подается напряжение $\dot{U}_1$. Сопротивление намагничивающего контура в Г-образной схеме берется равным $(Z_m + Z_1)$ и по нему протекает фиктивный ток холостого хода $\dot{I}_0''$, равный току $\dot{I}_0$ в Т-образной схеме при идеальном холостом ходе, когда $s = 0$. Ток $\dot{I}_2''$ в рабочем контуре Г-образной схемы определяется из условий неизменности тока $\dot{I}_1 = \dot{I}_0'' + (-\dot{I}_2'')$, откуда

$$-\dot{I}_2'' = \dot{I}_1'' - \dot{I}_0'' = \frac{\dot{U}_1(1 + Z_{2s}'/Z_m)}{Z_1 + \dot{C}_1 Z_{2s}'} - \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{C}_1(Z_1 + \dot{C}_1 Z_{2s}')} = \frac{-\dot{I}_2'}{\dot{C}_1},$$

где $\dot{I}_2''$ и $\dot{I}_2'$ – токи рабочих контуров в Г- и Т-образной схемах замещения, при этом сопротивление рабочего контура в Г-образной схеме замещения

$$Z_{\text{рк}} = \dot{C}_1(Z_1 + \dot{C}_1 Z_{2s}') = \dot{C}_1 Z_1 + \dot{C}_1^2 Z_2' + \dot{C}_1^2 R_2'(1-s)/s.$$

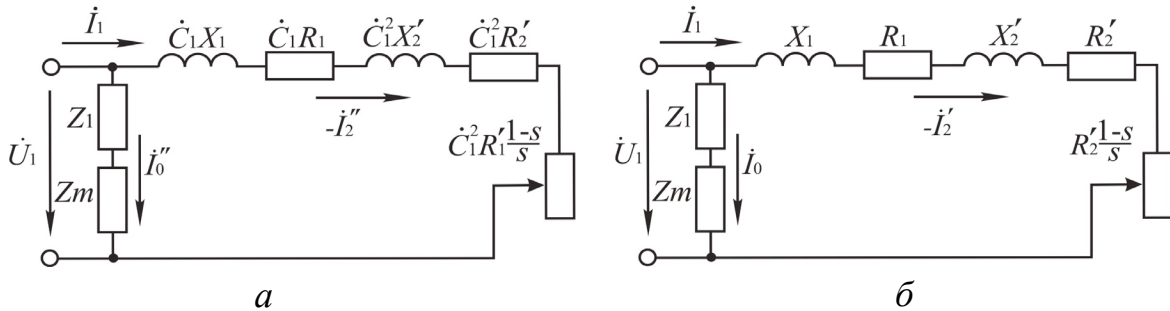


Рис. 5.14. Г-образные схемы замещения асинхронной машины

Обычно погрешность в определении токов в статоре и роторе при переходе от Т- к Г-образной схемам замещения не превышает нескольких процентов.

В практических инженерных расчетах комплекс $\dot{C}_1$ часто заменяют модулем C_1 , который для асинхронных двигателей мощностью 10 кВт и выше равен 1,02...1,05. При анализе электромагнитных процессов в машинах общего применения часто полагают $C_1 \approx 1$, что существенно облегчает расчеты и мало сказывается на точности полученных результатов. Г-образную схему замещения при $C_1 = 1$ называют упрощенной схемой замещения с вынесенным намагничивающим контуром (рис. 5.14, б). В этой схеме ток $\dot{I}_0''$ без большой погрешности можно приравнять току $\dot{I}_0$.

5.6. Электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронной машины

Формулу (5.13), полученную из энергетической диаграммы, преобразуем к более удобному для анализа виду, подставив в нее значение $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ и $\Delta P_{эл2} = m_2 I_2 E_{2s} \cos \psi_2$, где ψ_2 – угол сдвига фаз между ЭДС и током ротора. При этом с учетом (5.9) получим

$$M = (p m_2 w_2 k_{о62} / \sqrt{2}) \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = c_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2, \quad (5.23)$$

где $c_m = p m_2 w_2 k_{о62} / \sqrt{2}$ – постоянная.

Формула (5.23) справедлива не только для асинхронных машин, но и для электрических машин всех типов. Во всех этих машинах электромагнитный момент пропорционален произведению магнитного потока на активную составляющую тока ротора.

Наибольшее значение для оценки свойств асинхронного двигателя имеет механическая характеристика, представляющая собой графическую зависимость частоты вращения ротора n от вращающего момента M , т. е. $n = f(M)$ или $M = f(n)$. Иногда эта зависимость выражается в виде $M = f(s)$ или $M = f(v_{отн})$, где $v_{отн} = n/n_1$ – относительная частота вращения. При этом

$$s = (n_1 - n) / n_1 = 1 - v_{отн}.$$

Использование понятий относительной частоты вращения и скольжения придает механической характеристике более общий характер. Для построения механической характеристики можно воспользоваться формулой

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 s [(R_1 + C_1 R_2'/s)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2]}, \quad (5.24)$$

которая получена из формулы

$$M = \frac{\Delta P_{эл2}}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_1 s}$$

путем подстановки значения тока $I_2' = C_1 I_2''$ из схемы замещения (см. рис. 5.14, а):

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + C_1 R_2'/s)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}}$$

Для машин мощностью более 10 кВт величина $C_1 \approx 1$ и (5.24) приобретает более простой вид:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (5.25)$$

Задавая значения s , при известных параметрах двигателя можно определить M и построить искомую механическую характеристику.

Механическая характеристика (рис. 5.15, *а* и *б*) имеет максимум момента при частоте вращения $n \approx (0,8 \dots 0,9) n_1$; при частоте вращения $n = n_1$ момент вращения $M = 0$, а при $n = 0$ пусковой момент составляет $M_{\text{п}} = (0,3 \dots 0,7) M_{\text{max}}$.

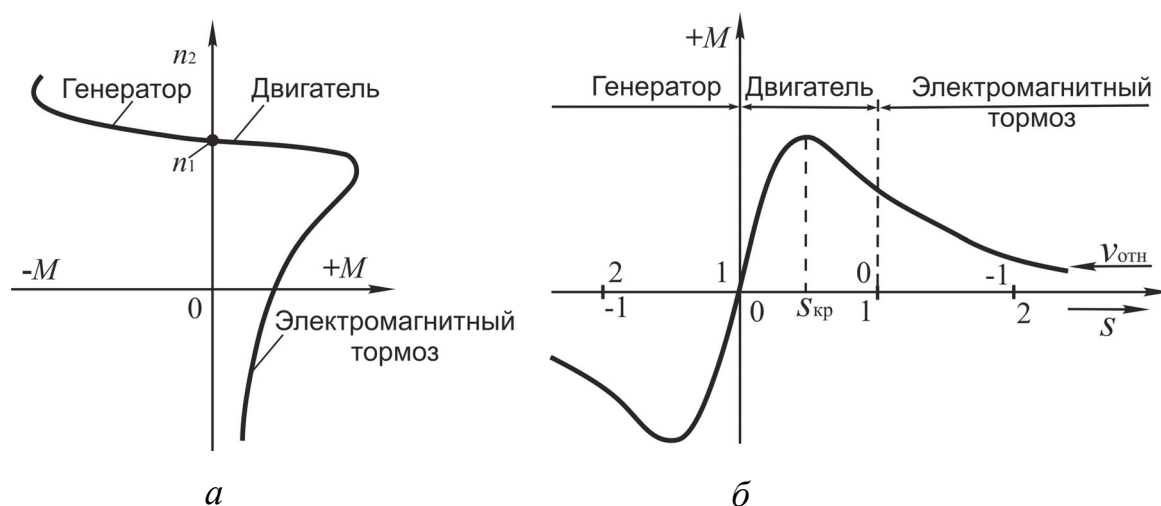


Рис. 5.15. Механические характеристики асинхронной машины

Скольжение, при котором момент имеет максимальное значение (критическое скольжение), можно определить из (5.24), взяв производную от момента по скольжению dM/ds и приравняв ее к нулю. Решая уравнение относительно s , получаем критическое скольжение:

$$s_{\text{кр}} = \frac{\pm C_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}}. \quad (5.26)$$

В первом приближении, принимая $C_1 = 1$ и пренебрегая величиной R_1 в знаменателе (так как $R_1 < (X_1 + X_2')$), имеем

$$s_{\text{кр}} = \frac{\pm R_2'}{X_1 + X_2'}.$$

Для получения высокого КПД необходимо снижать величину R_2' , вследствие чего максимум момента асинхронного двигателя достигается при относительно высоких частотах вращения. Значение максимального момента получим из (5.24), подставив значение $s_{\text{кр}}$ из (5.26):

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 C_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}]}, \quad (5.27)$$

Или приближенно считая $C_1 = 1$ и $R_1 = 0$,

$$M_{\max} \approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X_2')}.$$

Знак «+» относится к двигательному режиму, «-» – к генераторному.

Максимальный момент при генераторном режиме несколько больше, чем при двигательном, так как в генераторном режиме в (5.27) сопротивление R_1 принимается со знаком минус и знаменатель этой формулы уменьшается по сравнению с его значением для двигательного режима.

Из (5.27) видно, что максимальный момент не зависит от активного сопротивления ротора. Оно определяет лишь скольжение $s_{\text{кр}}$ при максимальном моменте.

Отношение $M_{\max}/M_{\text{ном}} = k_m$ определяет перегрузочную способность электродвигателя. Значение k_m – кратность максимального момента регламентируется стандартом и составляет для двигателей общепромышленного применения 1,7... 2,2. У двигателей, предназначенных для работы с большими перегрузками (крановые, металлургические и т. п.), значение k_m может достигать 3,5. Стандартом оговаривается также минимально допустимый вращающий момент $M_{\min}$, отношение которого к номинальному моменту должно быть не менее 0,6...1.

5.7. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 5.16) представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n , КПД η , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos\varphi$ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ $f_1 = \text{const}$.

Скоростная характеристика $n = f(P_2)$. Частота вращения ротора асинхронного двигателя в соответствии с формулой (5.2).

Скольжение по (5.14) $s = \Delta P_{\text{эл2}}/P_{\text{эм}}$. т. е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$. Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, можно принять $\Delta P_{\text{эл2}} = 0$, а поэтому $s \approx 0$ и $n_0 \approx n_1$. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя отношение $\Delta P_{\text{эл2}}/P_{\text{эм}}$ растет, достигая значений 0,01...0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при

увеличении активного сопротивления ротора R_2' угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения n при колебаниях нагрузки P_2 возрастают. Объясняется это тем, что с увеличением R_2' возрастают электрические потери в роторе.

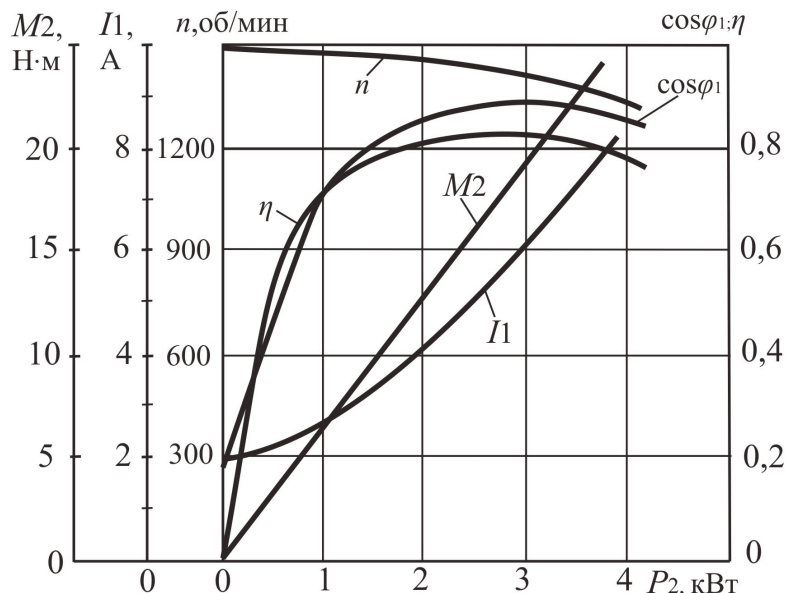


Рис. 5.16. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента на валу двигателя M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 60P_2 / (2\pi n_2) = 9,55P_2 / n_2.$$

Из этого выражения следует, что если $n_2 = \text{const}$, то график $M_2 = f_2(P_2)$ представляет собой прямую линию. Но в асинхронном двигателе с увеличением нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, а поэтому полезный момент на валу M_2 с увеличением нагрузки возрастает не столько быстрее нагрузки, а следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Зависимость $\cos\varphi_1 = f(P_2)$. В связи с тем что ток статора I_1 имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму х.х. Объясняется это тем, что ток х.х. I_0 при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ($I_1 \approx I_0$). В результате сдвиг по фазе тока статора $\dot{I}_1$ относительно напряжения $\dot{U}_1$ получается значительным ($\varphi_1 \approx \varphi_0$), лишь немногим меньше 90° . Коэффи-

коэффициент мощности асинхронных двигателей в режиме х.х. обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока I_1 и коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшего значения (0,80...0,90) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos\varphi_1$, что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора (X_{2s}) за счет увеличения скольжения, а следовательно, и частоты тока в роторе. В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда или, по крайней мере, значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности двигателя. Если же двигатель работает значительную часть времени недогруженным, то для повышения $\cos\varphi_1$ целесообразно подводимое к двигателю напряжение U_1 уменьшить. Например, в двигателях, работающих при соединении обмотки статора треугольником, это можно сделать пересоединив обмотки статора в звезду, что вызовет уменьшение фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. При этом магнитный поток статора, а следовательно, и намагничивающий ток уменьшаются примерно в $\sqrt{3}$ раз. Кроме того, активная составляющая тока статора несколько увеличивается. Все это способствует повышению коэффициента мощности двигателя.

Зависимость $\eta = f(P_2)$. КПД двигателя определяется выражением

$$\eta = 1 - \Sigma \Delta P / P_1,$$

где P_1 – мощность, поступающая в обмотку статора; $\Sigma \Delta P$ – сумма электрических, магнитных, механических и добавочных потерь (см. рис. 5.9).

КПД современных асинхронных двигателей при номинальной нагрузке для машин мощностью свыше 100 кВт составляет 0,92...0,96, мощностью 1...100 кВт – 0,7...0,9, а микромашин – 0,4...0,6 (большие значения КПД относятся к машинам большей мощности).

Примерное распределение потерь в четырехполюсном асинхронном двигателе мощностью 1...5 кВт приведено в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Потери и факторы, влияющие на них

Потери	% от общих потерь	Факторы, влияющие на потери
$\Delta P_{эл1}$	35...40	Размер проводников обмотки статора
$\Delta P_{эл2}$	15...20	Размер проводников (стержней и колец) ротора
ΔP_m	15...25	Марка стали, ее толщина и масса
$\Delta P_{мех}$	5...10	Марка подшипников, конструкция подшипникового узла
$\Delta P_{доп}$	1...5	Конструкция и технология изготовления двигателя

Для большинства электрических двигателей зависимость η от полезной мощности имеет общий характер.

При изменении нагрузки электрической машины отдельные виды потерь изменяются по-разному: электрические потери $\Delta P_{\text{эл}}$ обмоток статора и ротора, а также добавочные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки; электрические потери в щеточном контакте $\Delta P_{\text{щ.эл}}$ (в двигателях с фазным ротором) изменяются пропорционально току в первой степени; механические $\Delta P_{\text{мех}}$ и магнитные $\Delta P_{\text{м}}$ потери остаются практически постоянными – такими же, как при холостом ходе, если напряжение машины U_1 и частота ее вращения n не изменяются. По этому признаку все виды потерь можно разделить на две группы: постоянные потери $\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}}$ и переменные потери $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{щ.эл}} + \Delta P_{\text{доб}}$, которые можно приближенно считать пропорциональными квадрату тока нагрузки (обычно потери $\Delta P_{\text{щ.эл}}$ малы по сравнению с $\Delta P_{\text{эл}}$). Мощность P_2 , отдаваемая машиной ($P_{\text{эл}}$ в генераторах и $P_{\text{мех}}$ в двигателях), пропорциональна току нагрузки I в первой степени, поэтому зависимость КПД от тока нагрузки

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}) = AI/(AI + B + CI^2), \quad (5.28)$$

где A, B, C – постоянные.

Из (5.28) следует, что при изменении нагрузки электрической машины ее КПД изменяется, как показано на рис. 5.17. При холостом ходе $\eta = 0$, так как полезная мощность P_2 отсутствует. При увеличении нагрузки КПД возрастает за счет увеличения P_2 , но одновременно быстрее, чем P_2 возрастают переменные потери $\Delta P_{\text{пер}}$, поэтому при некотором токе $I_{\text{кр}}$ увеличение КПД прекращается и в дальнейшем начинает уменьшаться. Если взять производную $d\eta/dI$ и приравнять ее нулю, то можно получить условие максимума КПД – это наблюдается при такой нагрузке, при которой $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пост}}$.

При проектировании электрической машины обычно так распределяют потери мощности, что указанное условие выполняется при наиболее вероятной нагрузке машины, несколько меньшей номинальной. Во вращающихся электрических машинах средней и большой мощности это условие выполняется при нагрузках примерно 60...80 % от номинальной.

При увеличении номинальной мощности относительная величина суммарных потерь уменьшается. Следовательно,

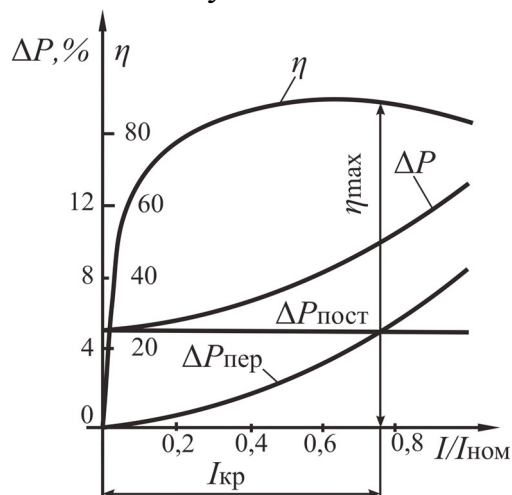


Рис. 5.17. Кривая КПД асинхронного двигателя и зависимость его потерь от тока нагрузки

должен возрастать и КПД машины. Эта закономерность проявляется во всех типах вращающихся электрических машин и в трансформаторах – машины большей номинальной мощности всегда имеют соответственно и больший КПД, и, наоборот, КПД машин малой мощности и микромашин обычно невелик. Так, например, КПД вращающихся электрических машин мощностью свыше 100 кВт составляет 0,92...0,96, мощностью 1...100 кВт – 0,7...0,9, а микромашин – 0,4...0,6.

Зависимость $I_1 = f(P_2)$. Активная составляющая тока пропорциональна полезной мощности. Реактивная составляющая в диапазоне рабочих нагрузок изменяется мало, так как она определяется главным образом током холостого хода, который составляет 20...40 % номинального тока.

В двигателях с фазным ротором кривые η и $\cos\varphi$ располагаются несколько ниже, чем у соответствующих двигателей с короткозамкнутым ротором. На это влияют следующие причины:

- возникновение дополнительных потерь мощности в результате наличия щеток на контактных кольцах;
- уменьшение полезной мощности в связи с худшим использованием объема пазов ротора (обмотку ротора выполняют из изолированного провода, вследствие чего пазы ротора частично заполнены изоляцией);
- увеличение намагничивающего тока вследствие возрастания магнитного сопротивления зубцового слоя ротора в результате уменьшения поперечного сечения зубцов.

5.8. Пуск асинхронных двигателей

При пуске двигателя по возможности должны удовлетворяться основные требования: процесс пуска должен осуществляться без сложных пусковых устройств; пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи – по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют двигатели; необходимость плавного пуска, максимального пускового момента и пр.

Практически используют следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск); понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске; подключение к обмотке ротора пускового реостата.

Прямой пуск. Этот способ применяют для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети возникающие пусковые токи не создавали чрезмерных электродинамических усилий и превышений температуры, опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины.

В асинхронных двигателях отношение L/R сравнительно мало (особенно в малых двигателях), поэтому переходный процесс в момент включения характеризуется весьма быстрым затуханием свободного тока. Это позволяет пренебречь свободным током и учитывать только установившееся значение тока переходного процесса.

Двигатели обычно пускают с помощью электромагнитного выключателя K – магнитного пускателя (рис. 5.18, а) и разгоняют автоматически по естественной механической характеристике M (рис. 5.18, б) от точки Π , соответствующей начальному моменту пуска, до точки P , соответствующей условию $M = M_c$. Ускорение при разгоне определяется разностью абсцисс кривых M и M_c и моментом инерции ротора двигателя и механизма, который приводится во вращение. Если в начальный момент пуска $M_{\Pi} < M_c$, двигатель разогнаться не сможет.

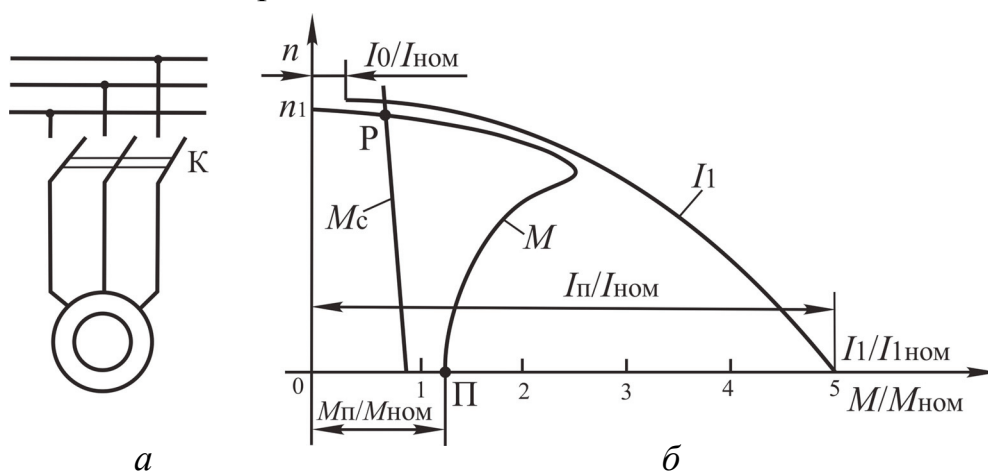


Рис. 5.18. Схема прямого пуска асинхронного двигателя (а) и графики изменения моментов и тока (б)

Значение начального пускового момента можно получить из формулы (5.25), приняв $s = 1$:

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (5.29)$$

Отношение моментов $M_{\Pi}/M_{\text{ном}} = k_{\text{п.м}}$ называют кратностью начального пускового момента. Для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6...100 кВт стандартом установлено $k_{\text{п.м}} = 1,0...2,0$; мощностью 100...1000 кВт – $k_{\text{п.м}} = 0,7...1,0$.

Получение кратностей пускового момента, больших регламентированных стандартом, обычно нежелательно, так как это связано либо с увеличением активного сопротивления ротора (5.29), либо с изменением конструкции ротора, что ухудшает энергетические показатели двигателя.

Недостатком данного способа пуска кроме сравнительно небольшого пускового момента является также большой бросок пускового тока, в 5...7 раз превышающий номинальное значение тока.

Несмотря на указанные недостатки, пуск двигателя путем непосредственного подключения обмотки статора к сети широко применяют благодаря простоте и хорошим технико-экономическим свойствам двигателя с короткозамкнутым ротором – низкой стоимости и высоким энергетическим показателем (η , $\cos\varphi_1$, k_m и др.).

Пуск при пониженном напряжении. Такой пуск применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения может осуществляться следующими путями:

а) переключением обмотки статора с помощью переключателя с нормальной схемы Δ на пусковую схему Y . При этом напряжение, подаваемое на фазы обмотки статора, уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, что обуславливает уменьшение фазных токов $\sqrt{3}$ раз и линейных токов в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают обратно на нормальную схему;

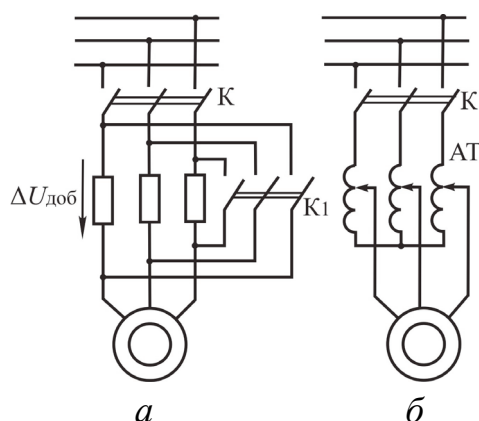


Рис. 5.19. Схемы включения асинхронного двигателя при пуске с понижением напряжения

б) включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных активных (резисторов) или реактивных (реакторов) сопротивлений (рис. 5.19, а). При этом на указанных сопротивлениях создаются некоторые падения напряжения $\Delta U_{доб}$, пропорциональные пусковому току, вследствие чего к обмотке статора подается пониженное напряжение. По мере разгона двигателя снижается ЭДС E_{2s} , индуцированная в обмотке ротора, а следовательно, и пусковой ток. В результате уменьшается падение напряжения $\Delta U_{доб}$,

на указанных сопротивлениях и автоматически возрастает приложенное к двигателю напряжение. После окончания разгона добавочные резисторы или реакторы замыкаются накоротко контактором K_1 ;

в) подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор АТ (рис. 5.19, б), который может иметь несколько ступеней, переключаемых в процессе пуска соответствующей аппаратурой.

Недостатком указанных методов пуска путем понижения напряжения является значительное уменьшение пускового и максимального мо-

ментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения, поэтому их можно использовать при пуске двигателей без нагрузки или при незначительной нагрузке.

На рис. 5.20 для примера приведены механические характеристики двигателя при номинальном и пониженном напряжении, т. е. при соединении обмотки статора по схемам Y и Δ , а также графики изменения тока I_1 и момента M при пуске двигателя путем переключения обмотки статора со Y на Δ . При соединении по схеме Y максимальный и пусковой моменты уменьшаются в 3 раза, вследствие чего двигатель не в состоянии осуществить пуск механизма с нагрузочным моментом $M_{\text{ном}}$.

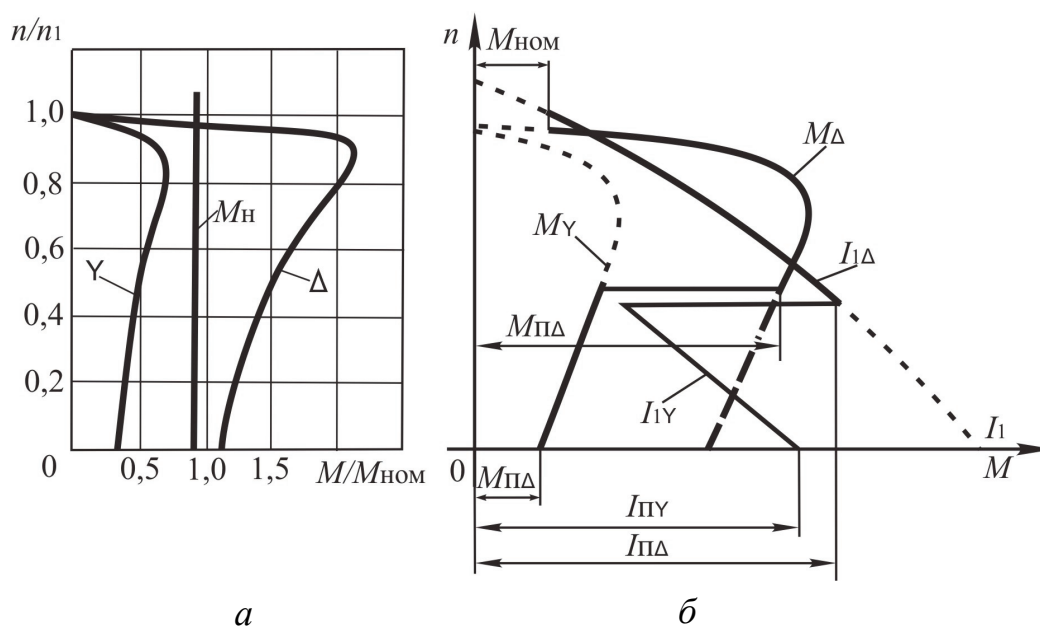


Рис. 5.20. Механические характеристики при включении обмотки статора двигателя по схемам Y и Δ (а) и графики изменения M и I_1 при пуске двигателя путем переключения обмотки статора со Y на Δ (б)

Пуск с помощью реостата в цепи ротора. Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют контактные кольца на роторе и неподвижные щетки, закрепленные на корпусе, для обеспечения возможности соединения через этот скользящий контакт вращающейся обмотки с внешними цепями. Это бывает необходимо в следующих случаях:

- а) включение в цепь ротора пускового реостата для ограничения токов при пуске и увеличения пускового момента (5.29);
- б) включение в цепь ротора регулировочного реостата, предназначенного для регулирования скорости вращения ротора;
- в) подача питания в обмотку ротора в режиме так называемой машины двойного питания;

з) снятие с обмотки ротора напряжения другой частоты f_2 , отличающейся от подаваемой на статор. Это делается в электромашинных преобразователях частоты и схемах электромеханических каскадов.

Рассмотрим случай реостатного пуска двигателя. Реостат имеет несколько ступеней сопротивлений, переключаемых вручную или автоматически. Расчет и настройка значений их ступеней сопротивлений должны обеспечивать изменение момента в процессе пуска от $M_{\max}$ до $M_{\min}$, а ток ротора – от $I_{2\max}$ до $I_{2\min}$ (рис. 5.21). Команду на очередное переключение сопротивления удобнее всего подавать с помощью токового реле в зависимости от значения I_2 .

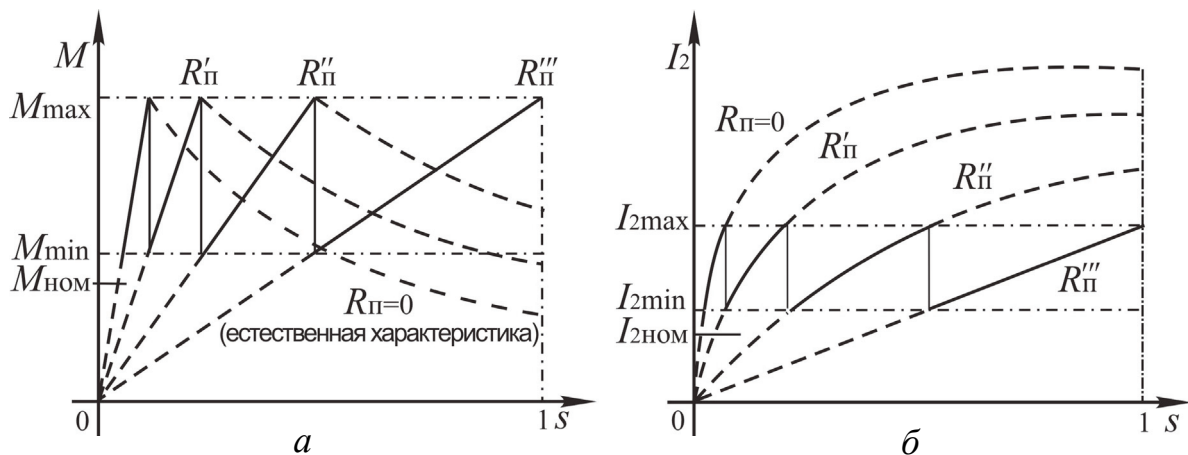


Рис. 5.21. Изменение момента (а) и тока ротора (б) при реостатном пуске асинхронного двигателя ($R_{\Pi}''' > R_{\Pi}'' > R_{\Pi}'$)

При пуске сопротивление пускового реостата R_{Π} складывается с собственным активным сопротивлением обмотки ротора R_2' . Значение максимального момента при этом не изменяется, так как не зависит от активного сопротивления роторной цепи (5.27), но смещается вправо по оси скольжения (см. рис. 5.21, а). Это объясняется тем, что критическое скольжение растет при увеличении активного сопротивления ротора (5.26). По этой же причине растет пусковой момент M_{Π} , однако его значение не может превысить максимальный момент $M_{\max}$. Если продолжать увеличение сопротивления в роторе сверх $R_{\max} = R_{\Pi}'''$, то $s_{\text{кр}}$ станет больше 1 и пусковой момент начнет падать.

При увеличении сопротивления роторной цепи пусковой ток уменьшается, что, конечно же, благоприятно для обмотки и щеточного контакта (см. рис. 5.21, б).

Пуск начинается с самым большим сопротивлением R_{Π}''' . При увеличении скорости вращения ротора скольжение, момент и ток ротора уменьшаются. Когда ток достигает значения $I_{2\min}$, подается команда на переключе-

чение пускового реостата на следующую ступень сопротивления R_{π}'' , при этом двигатель переходит на другую механическую характеристику и т.д.

По окончании процесса пуска пусковой реостат выводится из работы, обмотка ротора замыкается накоротко и машина работает по кривой $R_{\pi} = 0$, которая называется естественной механической характеристикой. Остальные характеристики называются реостатными.

Траектории изменения M и I_2 при пуске на рис. 5.21 показаны сплошной линией.

Достоинствами реостатного пуска являются:

- возможность получения больших пусковых моментов, т. е. пуск двигателя возможен при значительных нагрузках;
- нормальные потери мощности при пуске, так как токи ротора и статора не превышают заданных пределов.

5.9. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

В процессе работы многих машин и механизмов требуется регулирование скорости их движения. К ним относятся электрический транспорт, лифты, станки, электроинструмент и др. В последние годы традиционно нерегулируемые электроприводы заменяют регулируемыми в целях снижения потребления ими электрической энергии. При этом наибольший эффект достигается, если двигатель работает с переменной нагрузкой. Задача стабилизации скорости вращения решается теми же средствами, что и задача ее регулирования.

Экономично, т. е. с высоким КПД, в широком диапазоне можно регулировать скорость вращения коллекторных двигателей постоянного тока, которые применяются в качестве тяговых на электрическом транспорте, для вращения гребных винтов кораблей, валков прокатных станов в металлургии и т. п.

В то же время понятно стремление построить регулируемый электрический привод с асинхронным двигателем, который в отличие от коллекторного не имеет скользящего контакта, т. е. надежнее и безопаснее в эксплуатации.

На основании формул (4.1), (5.1) и (5.2) можно записать

$$n = \frac{60f}{p}(1-s). \quad (5.30)$$

Согласно (5.30), существуют три способа регулирования скорости вращения ротора асинхронных двигателей:

- регулирование частоты питающего напряжения;

- изменение числа полюсов;
- воздействие на скольжение.

Частотное регулирование. Для реализации этого способа требуется автономный источник электроэнергии переменной частоты: синхронный генератор, вращающийся с переменной скоростью, или статический (т. е. не вращающийся) полупроводниковый преобразователь частоты. Такой автономный источник может питать как один асинхронный двигатель, так и их группу.

В технике используются различные типы преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением. Высшие временные гармоники напряжения и тока вызывают дополнительные потери мощности и несколько снижают энергетические показатели регулируемого асинхронного двигателя.

Если пренебречь относительно малым падением напряжения на полном сопротивлении обмотки статора, то из формулы (5.7) $U_1 \approx E_1$ становится очевидным, что для сохранения постоянным потока в машине при регулировании частоты необходимо одновременно пропорционально изменять напряжение. Эту двойную функцию и выполняет преобразователь частоты, реализуя отношение $U_1/f = \text{const}$. Однако на практике в частотно-регулируемых электроприводах используются и другие, более сложные законы регулирования.

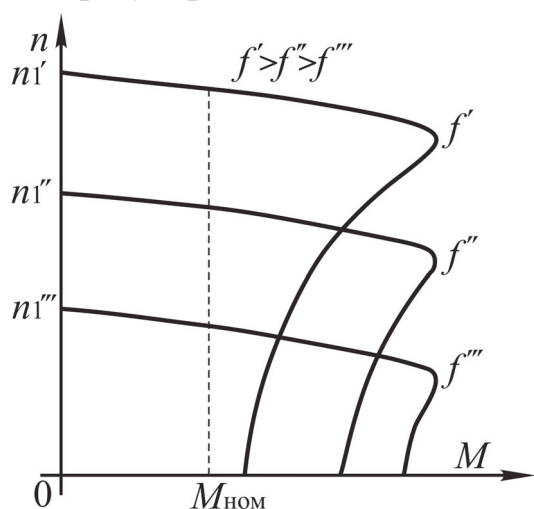


Рис. 5.22. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании

Виды механических характеристик асинхронных двигателей при частотном регулировании показаны на рис. 5.22.

В настоящее время в лучших современных преобразователях частоты используют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) посредством коммутации приборов силовой электроники. При этом из практически прямоугольных импульсов с частотой порядка десятка килогерц формируется низкочастотная кривая рабочего напряжения (тока) статора двигателя. Крутые фронты импульсов вызывают волновые

переходные процессы и перенапряжения в системе преобразователь-двигатель, для защиты от которых используют фильтры заземления и усиление изоляции витков обмотки статора.

Изменяя частоту, можно регулировать скорость вращения асинхронного двигателя в очень широком диапазоне, сохраняя при этом высокими

его энергетические показатели. Однако наличие преобразователя частоты повышает стоимость и усложняет обслуживание электропривода.

Изменение числа полюсов. Пути реализации этого способа регулирования скорости вращения асинхронных двигателей следующие:

- размещение в пазах статора нескольких обмоток с различным числом полюсов. Напряжение питания в этом случае переключается с одной обмотки на другую в зависимости от требуемой скорости. Модификации таких многоскоростных асинхронных двигателей на две, три и даже четыре скорости вращения, имеющиеся в единых сериях, используются, например, в электроприводах лифтов;

- изменение схемы обмотки статора путем переключения ее катушек;

- использование так называемой полюсно-амплитудной модуляции, изменяющей схему обмотки. В этом случае в результате наложения полей катушек или катушечных групп изменяется число полюсов результирующего магнитного поля в воздушном зазоре. При этом появляется большее число высших пространственных гармоник.

Недостатками регулирования скорости вращения изменением числа полюсов являются:

- невозможность плавного регулирования (скорость изменяется только дискретно, скачком);

- более высокие габаритные размеры, масса и стоимость многоскоростных двигателей по сравнению с односкоростными и нерегулируемыми.

Воздействие на скольжение. Управлять скоростью вращения ротора асинхронного двигателя (5.30) можно, регулируя напряжение питания или изменяя активное сопротивление цепи фазного ротора.

Регулирование изменением напряжения. Момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения на зажимах обмотки статора (5.24). Если каким-нибудь регулятором уменьшать напряжение, максимальный момент резко понижается (5.27), а критическое скольжение остается неизменным (5.26). При заданном графике нагрузки (например, статическом моменте $M_c(s) = \text{const}$) рабочее скольжение и скорость вращения ротора также будут изменяться. Причем у обычного нерегулируемого асинхронного двигателя диапазон изменения скольжения невелик (рис. 5.23, а) и для его расширения надо повысить $s_{\text{кр}}$, т. е. увеличить активное сопротивление обмотки ротора. Существует модификация асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором – двигатели с повышенным скольжением.

Работа асинхронного двигателя при повышенном скольжении неэкономична, так как в этом случае велики потери в обмотке ротора $s = \Delta P_{\text{эл2}}/P_{\text{эм}}$. Поэтому таким способом регулируют скорость вращения ротора в малом диапазоне и только в двигателях небольшой мощности.

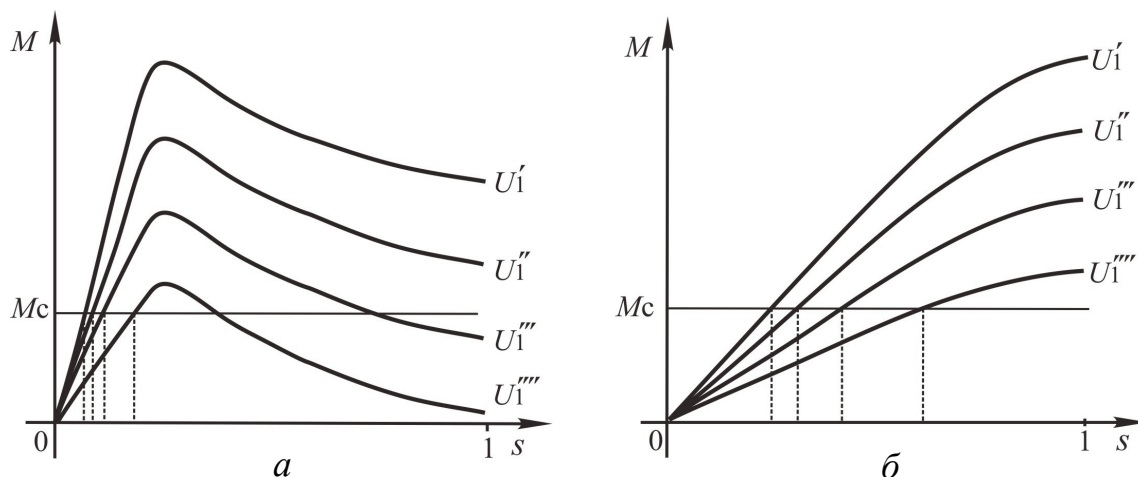


Рис. 5.23. Изменение скольжения регулированием напряжения ($U_1' > U_1'' > U_1''' > U_1''''$) в обычном (а) и исполнительном (б) асинхронных двигателях

В автоматике и приборной технике широко применяются асинхронные микродвигатели мощностью до 50 Вт, у которых $s_{кр} \geq 1$. Активное сопротивление обмотки ротора таких двигателей велико, так как она изготовляется из сплава с повышенным сопротивлением в виде беличьей клетки или тонкостенного стаканчика – полого ротора без магнитного сердечника. Достоинством этой конструкции является также и малая инерционность, т. е. высокое быстродействие. Указанные двигатели малой мощности называют исполнительными (или серводвигателями), диапазон регулирования скорости вращения в них широкий (см. рис. 5.23, б), КПД низкий – 20...40 %.

Реостатное регулирование двигателя с фазным ротором. Реостат в цепи ротора должен быть рассчитан на продолжительную работу, а не только на кратковременное протекание пускового тока.

Регулирование скорости вращения легко понять из рис. 5.21, а. Если при заданном моменте нагрузки, равном, например, номинальному $M_{ном}$, изменять сопротивление регулировочного реостата, то рабочее скольжение будет тоже меняться в некотором диапазоне. Обычно этот диапазон невелик, так как в реостате при этом возникают потери, поэтому данный способ регулирования тоже неэкономичен.

6. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

6.1. Устройство трехфазных синхронных машин

Как следует из названия синхронных машин, скорость вращения ротора n равна скорости вращения магнитного поля n_1 и ротор вращается в сторону вращения поля. Следовательно, скольжение синхронных машин в установившемся режиме работы и частоту токов в роторе можно выразить в следующем виде:

$$s = (n_1 - n)/n_1 = 0;$$
$$f_2 = sf_1 = 0.$$

Таким образом, цепь ротора синхронной машины является цепью постоянного тока, а ЭДС наводится только в обмотке статора. Поэтому в синхронных машинах помимо деления активной части на неподвижную и подвижную (статор и ротор) существует и другое деление: часть машины переменного тока, в которой наводится ЭДС, называется **якорем**, а часть машины с цепью постоянного тока – **индуктором**. В классическом варианте конструкции этих машин статор является якорем, а ротор – индуктором. (Синхронные машины небольшой мощности иногда имеют обратное исполнение, т. е. якорем является ротор, а индуктором – статор).

Статор (якорь) синхронной машины не отличается от статора машины асинхронной. Ротор – это система постоянного тока, поэтому его магнитопровод может выполняться как массивным, так и шихтованным (рис. 6.1). Обмотка 4 ротора, питающаяся от источника постоянного тока, является однофазной и называется **обмоткой возбуждения**.

Сердечник статора синхронной машины не отличается от сердечника статора машины асинхронной и представляет собой полый цилиндр, набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности этого цилиндра выштампованы пазы для укладки обмотки якоря. При внешнем диаметре сердечника менее 1 м его собирают из цельных кольцевых пластин, а при большем диаметре каждый кольцевой слой составляют из отдельных сегментов. Размещают сердечник в станине (корпусе) статора.

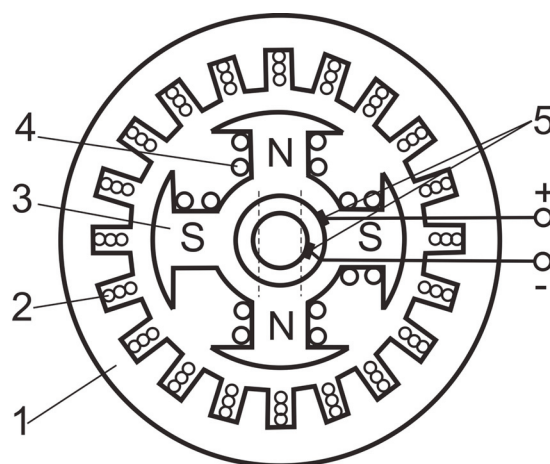


Рис. 6.1. Конструктивная схема синхронной машины:

- 1 – якорь; 2 – обмотка якоря; 3 – полюсы индуктора; 4 – обмотка возбуждения;
- 5 – контактные кольца со щетками

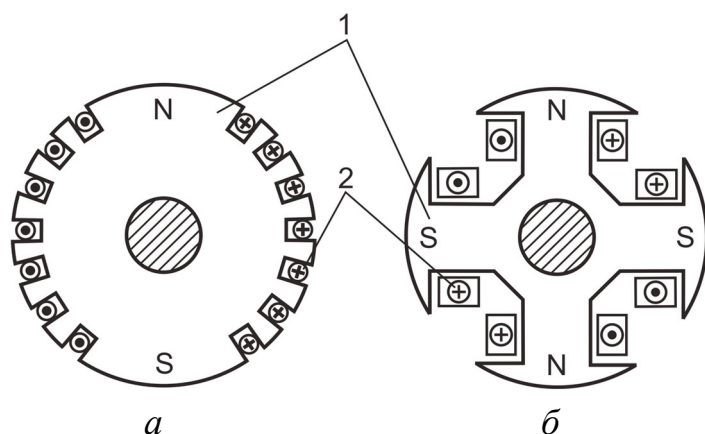


Рис. 6.2. Поперечные разрезы роторов неявнополюсной (*а*) и явнополюсной (*б*) машин:

1 – сердечник; 2 – обмотка возбуждения

В зависимости от конструкции магнитопровода ротора синхронные машины делятся на два класса (рис. 6.2): явнополюсные (ЯСМ) и неявнополюсные (НСМ). Ротор явнополюсных синхронных машин имеет выступающие полюсы. Сердечники полюсов для машин большой мощности шихтуются из пластин конструкционной стали толщиной 1...2 мм, а для машин небольшой мощности – из пла-

стин электротехнической стали толщиной 0,5...1 мм.

На рис. 6.3 показаны способы крепления полюсов. В машинах небольшой мощности полюсы 1 крепят болтами 2 непосредственно к валу (см. рис. 6.3, *а*), а в тихоходных машинах большей мощности – к ободу ротора. В мощных и относительно быстроходных машинах полюсы крепят к ободу ротора с помощью хвостов, имеющих форму ласточкина хвоста (см. рис. 6.3, *б*) или Т-образную форму. Такое крепление обеспечивает большую механическую прочность ротора.

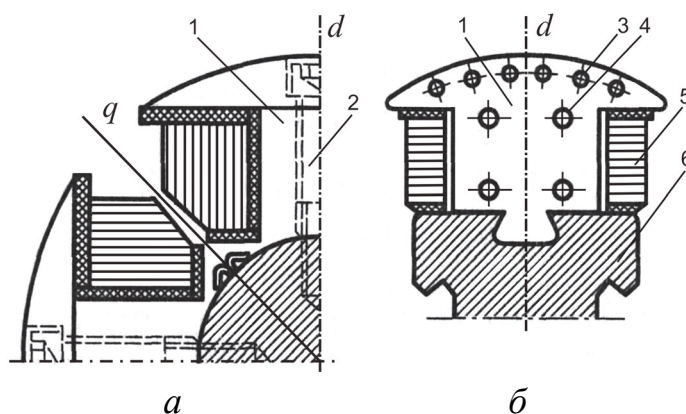


Рис. 6.3. Способы крепления полюсов:

а – болтами непосредственно к валу; *б* – с помощью ласточкина хвоста; 1 – полюс; 2 – болт; 3 – паз демпферной обмотки; 4 – стяжная шпилька; 5 – обмотка возбуждения; 6 – обод ротора

В магнитном отношении явнополюсный ротор имеет две оси симметрии: продольную d , совпадающую с осью полюсов и обмоткой возбуждения 5, и поперечную q , перпендикулярную продольной (смещенную на угол 90° электрических).

Катушки обмотки возбуждения в мощных машинах для лучшего охлаждения выполняют из неизолированных медных шин большого сечения, намотанных на ребро. Между соседними витками катушки укладывают изоляционные прокладки. В машинах небольшой мощности катушки обмотки возбуждения выполняют из изолированных проводников прямоугольного или круглого сечения. На полюсах ротора часто устанавливают **демпферную** обмотку, размещая ее в пазах 3 полюсных наконечников. Медные или латунные стержни этой обмотки, уложенные в пазы, по торцам замыкают кольцами таким образом, чтобы образовалась короткозамкнутая клетка.

Демпферная обмотка (рис. 6.4) выполняет ряд функций. В генераторах она ослабляет влияние токов обратной последовательности при несимметричной нагрузке и уменьшает пульсации магнитного потока, вызванные зубчатостью статора. В двигателях она выполняет функции пусковой обмотки (типа беличьей клетки) и уменьшает амплитуду качаний ротора при изменении нагрузки.

Общий вид ротора явнополюсной машины с горизонтальным валом показан на рис. 6.5.

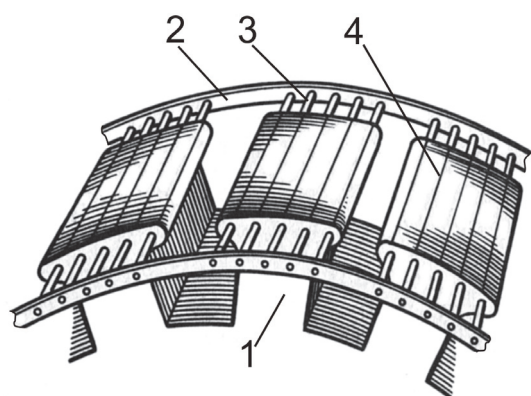


Рис. 6.4. Устройство демпферной обмотки:
1 – полюсы ротора; 2 – короткозамыкающие кольца; 3 – стержни;
4 – полюсные наконечники

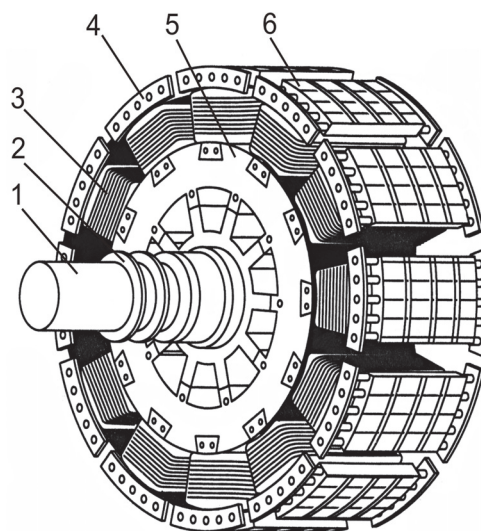


Рис. 6.5. Общий вид ротора явнополюсной синхронной машины с горизонтальным валом:
1 – вал; 2 – контактные кольца;
3 – обмотка возбуждения; 4 – демпферная обмотка; 5 – обод ротора; 6 – полюсы

Синхронные явнополюсные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с гидравлическими турбинами, называются гидрогенераторами. В зависимости от типа гидротурбины гидрогенераторы могут быть как с горизонтальным, так и с вертикальным валом. Механическая прочность различных деталей гидрогенераторов рассчитывается

по угонной частоте вращения, которая в два-три раза больше номинальной и может достигаться при аварийном отключении генератора от сети.

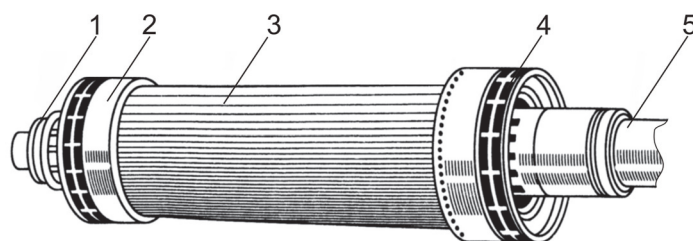


Рис. 6.6. Общий вид ротора неявнополусной синхронной машины:

1 – контактные кольца; 2 – бандаж обмотки возбуждения; 3 – бочка ротора; 4 – вентилятор; 5 – вал

Неявнополусные роторы (рис. 6.6, 6.7) применяют в высокоскоростных (с частотой вращения n равной 1500 или 3000 об/мин) синхронных машинах большой мощности, так как при большой мощности применение машин явнополусной конструкции невозможно по условиям механической прочности ротора. Неявно-

полусные роторы имеют быстроходные синхронные двигатели большой мощности – турбодвигатели и синхронные неявнополусные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами (турбогенераторы).

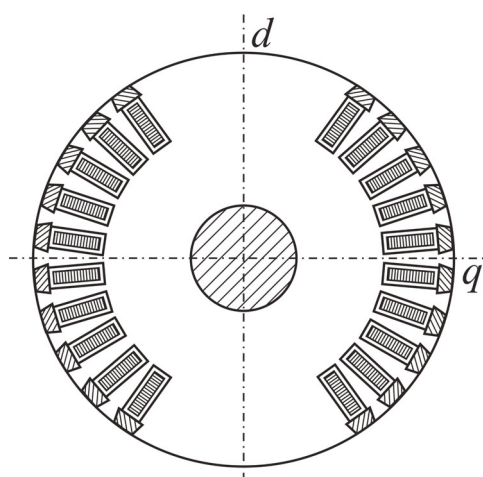


Рис. 6.7. Поперечный разрез ротора двухполусного турбогенератора

Ротор турбогенераторов изготовляют массивным, из цельной поковки, выполненной из высокопрочной легированной стали. По условиям сохранения механической прочности ротора его диаметр при частоте вращения 3000 об/мин не должен превышать 1200...1250 мм. На наружной поверхности ротора фрезеруют прямоугольные пазы, в которые укладывают катушки обмотки возбуждения (см. рис. 6.7). Примерно на одной трети полюсного деления обмотку не укладывают, и эта

часть образует так называемый большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока возбуждения.

Из-за больших центробежных сил, действующих на обмотку возбуждения, ее крепление в пазах производят с помощью немагнитных металлических клиньев. Эти клинья ослабляют магнитные потоки пазового ротора рассеяния, которые могут вызывать насыщение зубцов и приводить к уменьшению полезного потока. Лобовые части обмотки возбуждения закрепляют роторными бандажами 2 (см. рис. 6.6), а ее выводы подсоединяют к контактным кольцам 1.

6.2. Системы возбуждения синхронных машин

Большинство синхронных машин имеет электромагнитное возбуждение, при котором поток возбуждения создается обмоткой ротора, соединенной с источником постоянного тока. Система возбуждения должна обеспечивать достаточно быстрое, надежное и устойчивое регулирование тока возбуждения в любых режимах работы машины. Для увеличения быстродействия регулирования в аварийных режимах работы применяется форсировка возбуждения, т.е. быстрое увеличение напряжения возбуждения до предельного значения, равного $1,8 \dots 2,0$ номинального напряжения возбуждения. Кроме того, система возбуждения должна обеспечивать быстрое гашение магнитного поля, т.е. уменьшение тока возбуждения до нуля без значительных перенапряжений на обмотках. Необходимость в гашении поля возникает при аварийном отключении машины или обнаружении повреждения в ней.

В синхронных машинах применяется несколько систем возбуждения. Простейшей из них является электромашинная система (независимое возбуждение), в которой в качестве источника возбуждения используют специальный генератор постоянного тока, называемый возбудителем (рис. 6.8, а). Возбудитель 7 приводится во вращение от вала синхронного генератора, а обмотка якоря возбудителя через контактные кольца 4 соединена с обмоткой возбуждения 3 синхронного генератора. Ток возбуждения синхронной машины регулируют с помощью регулятора напряжения 6, установленного в цепи возбуждения возбудителя 7.

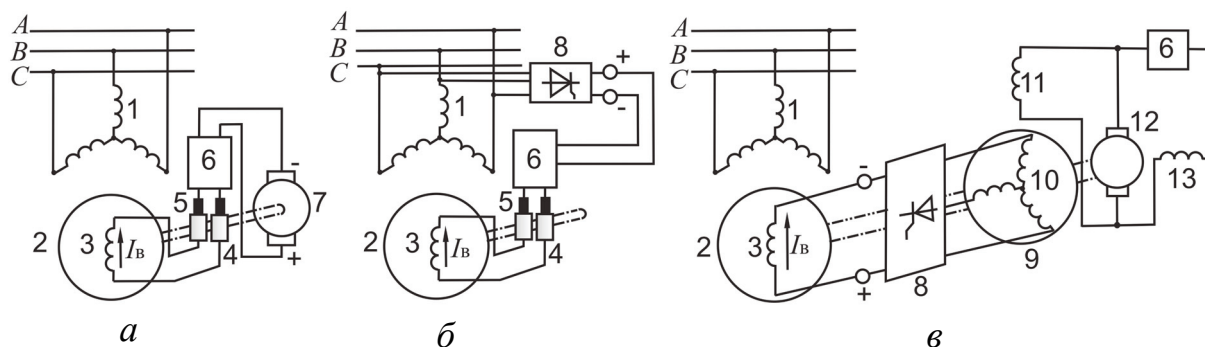


Рис. 6.8. Схемы возбуждения синхронной машины:

- 1 – обмотка якоря; 2 – ротор генератора; 3 – обмотка возбуждения; 4 – кольца;
- 5 – щетки; 6 – регулятор напряжения; 7 – возбудитель; 8 – выпрямитель;
- 9 – ротор возбудителя; 10 – обмотка якоря возбудителя; 11 – обмотка возбуждения возбудителя; 12 – подвозбудитель; 13 – обмотка возбуждения подвозбудителя

В настоящее время все большее применение получают вентильные системы возбуждения, которые могут рассчитываться на большие мощности и имеют высокую надежность. Различают три вида вентильных систем

возбуждения: систему с самовозбуждением; независимую систему возбуждения; бесщеточную систему возбуждения.

В вентильной системе с самовозбуждением (рис. 6.8, б) обмотка возбуждения 3 получает питание от управляемого статического выпрямителя 8, подключенного к выводам обмотки якоря 1 синхронного генератора. Начальное возбуждение синхронного генератора происходит за счет остаточного намагничивания его полюсов.

В вентильной независимой системе возбуждения обмотка возбуждения получает питание от якоря отдельного трехфазного синхронного генератора (возбудителя), ротор которого соединен с валом главного генератора. Переменное напряжение возбудителя подается на статический выпрямитель и далее через контактные кольца подводится к обмотке возбуждения.

Бесщеточная система возбуждения (рис. 6.8, в) является разновидностью вентильной независимой системы возбуждения. Только в этом случае возбудителем является синхронный генератор, имеющий обращенную конструкцию (якорь – на роторе, индуктор – на статоре). Обмотка возбуждения возбудителя 11 получает питание от обмотки 13 подвозбудителя 12, снабженного регулятором напряжения 6. Обмотка якоря возбудителя 10 соединяется с обмоткой возбуждения 3 основного генератора через вращающийся выпрямитель 8, расположенный на валу генератора, что позволяет отказаться от использования скользящего контакта. Тем самым увеличивается надежность системы возбуждения.

6.3. Принцип действия синхронных машин

Рассмотрим **принцип действия синхронного генератора**. Если по его обмотке возбуждения пропустить постоянный ток, то этот ток создаст постоянное во времени и неподвижное относительно ротора магнитное поле с чередующейся полярностью. При вращении ротора (индуктора) приводным двигателем его магнитное поле будет вращаться относительно неподвижной обмотки статора (якоря) и наводить в ней переменную ЭДС.

Если на якоре уложена симметричная трехфазная обмотка (т. е. магнитные оси фаз сдвинуты в пространстве на 120° электрических, а электрические сопротивления и числа витков фаз одинаковы), то в этой обмотке индуцируется симметричная система ЭДС (т. е. равных по модулю и сдвинутых во времени на 120°). При этом частота индуцируемых в обмотках ЭДС определяется в соответствии с (4.1)

$$f_1 = \frac{pn}{60}, \quad (6.1)$$

где p – число пар полюсов обмотки; n – скорость ротора, об/мин.

Если к трехфазной обмотке якоря синхронного генератора подключить симметричное внешнее сопротивление, то по этой обмотке будет протекать симметричная система токов, создающих круговое вращающееся магнитное поле якоря (см. подраздел 4.3). Частота вращения этого поля относительно статора

$$n_1 = 60f_1/p. \quad (6.2)$$

Подставив в (6.2) вместо f_1 правую часть выражения (6.1), получим $n_1 = n$. Следовательно, магнитные поля возбуждения и якоря неподвижны относительно друг друга и образуют результирующее магнитное поле машины.

При работе синхронной машины в режиме двигателя симметричная трехфазная обмотка якоря присоединяется к трехфазной сети. При этом образуется вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_1 , которое, взаимодействуя с полем возбуждения, создает вращающий момент.

6.4. Работа синхронного генератора при холостом ходе

Под холостым ходом синхронного генератора понимается такой режим его работы, при котором ротор вращается приводным двигателем, а ток в обмотке якоря равен нулю. В этом случае магнитное поле машины создается обмоткой возбуждения и его можно разложить на две составляющие: основное поле, магнитные линии которого пронизывают обмотку якоря, и поле рассеяния, магнитные линии которого сцеплены только с обмоткой возбуждения.

Магнитный поток основного поля при вращении ротора индуцирует в обмотке якоря ЭДС, форма изменения которой во времени должна быть максимально приближена к синусоиде. Это требование стандарта качества электрической энергии (ГОСТ 13109-97), критерием для оценки которого служит коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %:

$$K_{\text{нс}U} = 100(\sqrt{\sum U_n^2})/U_{\text{ном}},$$

где U_n , $U_{\text{ном}}$ — действующие значения соответственно высших гармонических составляющих и номинального напряжения; n — номер гармонической составляющей, $n = 2 \dots 40$.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в трехфазных сетях переменного тока напряжением до 1 кВ не должен превышать 8 %, а в сетях напряжением 35 кВ — 4 %.

Для получения кривой ЭДС, близкой к синусоиде, необходимо, чтобы кривая магнитного поля возбуждения машины в воздушном зазоре была по возможности близка к синусоидальной. Поскольку магнитный поток

Φ , создающая его МДС F и магнитное сопротивление R_μ связаны законом Ома для магнитной цепи $\Phi = F/R_\mu$, то это требование можно выполнить различными путями.

В явнополусной синхронной машине МДС постоянна на полюсном делении (обмотка возбуждения сосредоточенная). Следовательно, для обеспечения синусоидальности распределения магнитного потока необходимо, чтобы магнитное сопротивление рабочему потоку изменялось обратно пропорционально синусоидальному закону.

Для этого зазор между полюсом и статором делают неравномерным: под краями полюса зазор δ_m обычно в 1,5...2,5 раза больше, чем под его серединой. На рис. 6.9 показано распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Для сравнения на рисунке штриховой линией дана кривая магнитной индукции при равномерном зазоре δ .

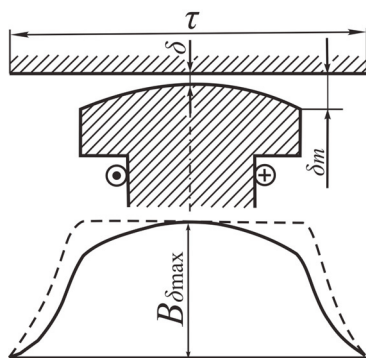


Рис. 6.9. Распределение индукции в явнополусной синхронной машине

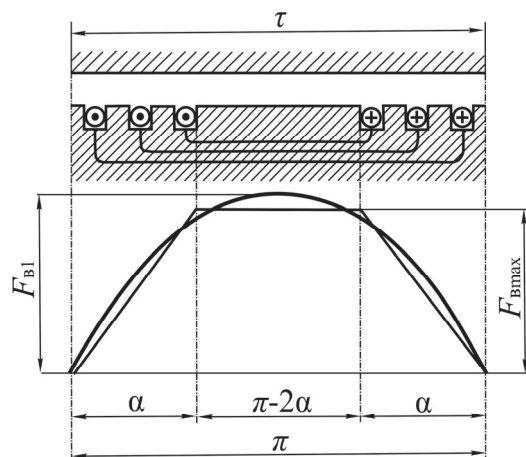


Рис. 6.10. Распределение МДС в неявнополусной синхронной машине

В неявнополусной синхронной машине неизменным остается магнитное сопротивление, так как воздушный зазор постоянен. Следовательно, для обеспечения синусоидальности распределения магнитного потока необходимо, чтобы МДС возбуждения изменялась по синусоидальному закону, поэтому обмотку возбуждения делают распределенной (см. рис. 6.2, а). Без учета влияния пазов можно считать, что МДС обмотки возбуждения и магнитное поле распределены по окружности по трапецеидальному закону (рис. 6.10). Амплитудные значения основных гармоник МДС и индукции поля возбуждения соответственно можно представить в следующем виде:

$$F_{Bm1} = (4/\pi)(\sin\alpha/\alpha)F_{Bmax} = (4/\pi)(\sin\alpha/\alpha)I_B w_B;$$

$$B_{\delta m1} = (4/\pi)(\sin\alpha/\alpha)B_{\delta max},$$

где α – половина длины дуги, на которой располагается обмотка возбуждения; $F_{\text{вmax}}$, $B_{\delta\text{max}}$ – максимальные значения соответственно МДС обмотки возбуждения на один полюс и индукции в воздушном зазоре; $w_{\text{в}}$, $I_{\text{в}}$ – соответственно число витков обмотки возбуждения на один полюс и ток возбуждения.

В целях улучшения формы кривой поля возбуждения часть полюса γ , на которой не укладывается обмотка, выбирают равной $\tau/3$ ($\gamma = \pi/3$). В этом случае в кривой магнитной индукции будут отсутствовать все гармоники, кратные трем, а остальные высшие гармоники будут ослаблены.

Помимо этого для улучшения формы кривой ЭДС обмотки якоря последнюю выполняют распределенной по пазам с укороченным шагом.

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС холостого хода, индуцируемой в обмотке якоря, от тока возбуждения при неизменной частоте вращения ротора, т. е. $E_0 = f(I_{\text{в}})$. Характеристика х.х. позволяет оценить насыщение магнитной цепи и построить другие характеристики машины.

Конструктивно обращенная синхронная машина является машиной постоянного тока (см. рис. 6.8, в), характеристика х.х. машины постоянного тока идентична характеристике х.х. синхронного генератора (см. рис. 2.4) и может быть получена расчетным и опытным путем. При токе возбуждения, равном нулю, в обмотке якоря индуцируется остаточная ЭДС $E_{\text{ост}}$, вызванная остаточной индукцией и составляющая 2...3 % от номинального напряжения генератора.

Сравнение характеристик холостого хода синхронных генераторов показывает, что эти характеристики, построенные в относительных единицах, мало чем отличаются друг от друга. Для перевода ЭДС в относительные единицы ее текущее значение делят на номинальное напряжение: $E = E/U_{\text{ном}}$. Относительное значение тока возбуждения находят делением его текущего значения на базисное: $I_{\text{в}}^* = I_{\text{в}}/I_{\text{в.баз}}$, причем току $I_{\text{в.баз}}$ соответствует $E = U_{\text{ном}}$ по расчетной характеристике холостого хода. Полученные таким образом характеристики называют нормальными характеристиками холостого хода.

6.5. Работа синхронного генератора под нагрузкой

Если к трехфазному синхронному генератору подключить симметричную трехфазную нагрузку, то по обмотке якоря будет протекать симметричная система токов, создающих вращающееся магнитное поле якоря, вращающееся с частотой n_1 , равной частоте вращения ротора n . Следовательно, магнитные потоки якоря Φ_a и возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ взаимно неподвижны и результирующий поток машины при нагрузке создается суммарным

действием МДС обмоток возбуждения и якоря и будет отличаться от магнитного поля при холостом ходе.

Воздействие МДС якоря на поле возбуждения машины называется **реакцией якоря**. Характер этого воздействия зависит от взаимного расположения в пространстве полей возбуждения и якоря. Поле возбуждения всегда направлено по оси полюсов (продольной оси d) и наводит в обмотке якоря ЭДС $\dot{E}_0$, направленную по поперечной оси q . Ориентация магнитного поля якоря по отношению к осям симметрии ротора, зависящая от ха-

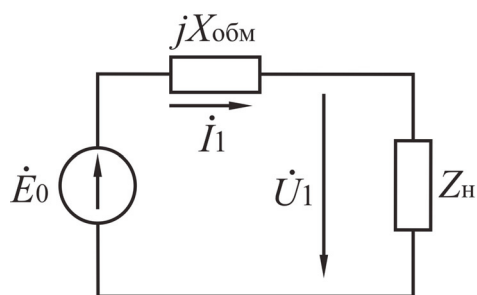


Рис. 6.11. Электрическая схема замещения фазы обмотки якоря

рактера сопротивления нагрузки, определяется углом сдвига между ЭДС $\dot{E}_0$ и током якоря $\dot{I}_1$, который обозначается буквой ψ . Если пренебречь относительно малым активным сопротивлением обмотки якоря по сравнению с ее индуктивным сопротивлением $X_{обм}$, то электрическую схему замещения для одной фазы обмотки якоря можно представить в виде, показанном на рис. 6.11. В этом случае угол ψ в зависимости от характера нагрузки Z_H может изменяться от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

Рассмотрим проявление реакции якоря в трех предельных случаях.

1. Ток якоря $\dot{I}_1$ отстает от $\dot{E}_0$ на угол $\psi = \pi/2$. Из анализа схемы (см. рис. 6.11) следует, что такому режиму соответствует индуктивный характер нагрузки ($Z_H = X_L$). На рис. 6.12 схематично показаны реакция якоря при индуктивной нагрузке и соответствующая этой нагрузке векторная диаграмма.

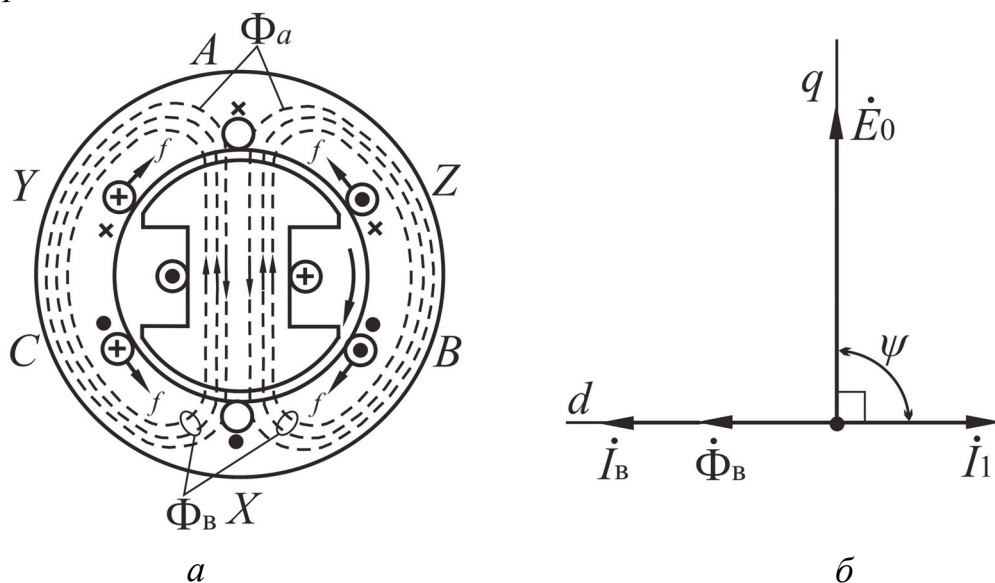


Рис. 6.12. Реакция якоря (а) и векторная диаграмма (б) синхронного генератора при индуктивной нагрузке

Для упрощения обмотка каждой фазы представлена одной катушкой. Будем считать, что поле возбуждения имеет синусоидальный характер.

При вращении ротора в обмотках фаз якоря наводятся ЭДС, направление которых определяется по правилу правой руки. Для момента времени, соответствующего положению ротора, приведенному на рисунке, направления ЭДС показаны крестиками и точками около проводников. Максимальная ЭДС индуцируется в проводниках фазы A , расположенных по оси полюсов (т. е. когда индукция возбуждения максимальна).

Порядок чередования фаз на этом рисунке согласован с направлением вращения ротора.

Магнитное поле якоря $\dot{\Phi}_a$, совпадающее с направлением тока якоря $\dot{I}_1$, направлено по продольной оси d навстречу полю возбуждения $\dot{\Phi}_b$. Следовательно, при индуктивной нагрузке в синхронном генераторе возникает продольная размагничивающая реакция якоря, а значит, результирующий магнитный поток и индуцированная в обмотке якоря ЭДС меньше, чем при холостом ходе.

Используя правило левой руки, по рис. 6.12 можно определить направления сил f , действующих на проводники якоря, а из этого заключить, что сумма сил, действующих на обмотку якоря, равна нулю. Следовательно, равен нулю и электромагнитный момент, развиваемый при этой нагрузке синхронным генератором. Иными словами, при индуктивной нагрузке (продольной реакции якоря) электромагнитный момент синхронного генератора равен нулю.

2. Ток якоря $\dot{I}_1$ опережает $\dot{E}_0$ на угол $\psi = \pi/2$. В соответствии с рис. 6.11 можно считать, что такому режиму соответствует емкостный характер нагрузки ($Z_n = X_C$). На рис. 6.13 схематично показаны реакция якоря синхронного генератора при емкостной нагрузке и соответствующая этой нагрузке векторная диаграмма. По сравнению с предыдущим случаем индуктивной нагрузки здесь токи фаз B и C изменили направление. Поле якоря по отношению к оси полюсов также продольное, но оно оказывает намагничивающее действие, вследствие чего результирующий магнитный поток и индуцированная в обмотке якоря ЭДС будут больше, чем при холостом ходе.

Следовательно, при емкостной нагрузке реакция якоря в синхронном генераторе является продольной и намагничивающей. Анализ направлений сил f показывает, что при емкостной нагрузке (продольной реакции якоря) электромагнитный момент синхронного генератора равен нулю.

3. Ток якоря $\dot{I}_1$, совпадает по фазе с $\dot{E}_0$ ($\psi = 0$). В соответствии с рис. 6.11 можно считать, что такому режиму соответствует смешанный (активно-емкостный) характер нагрузки $Z_n = R + jX_C$. При этом емкостное сопротивление X_C должно быть равно индуктивному сопротивлению обмотки якоря $X_{обм}$.

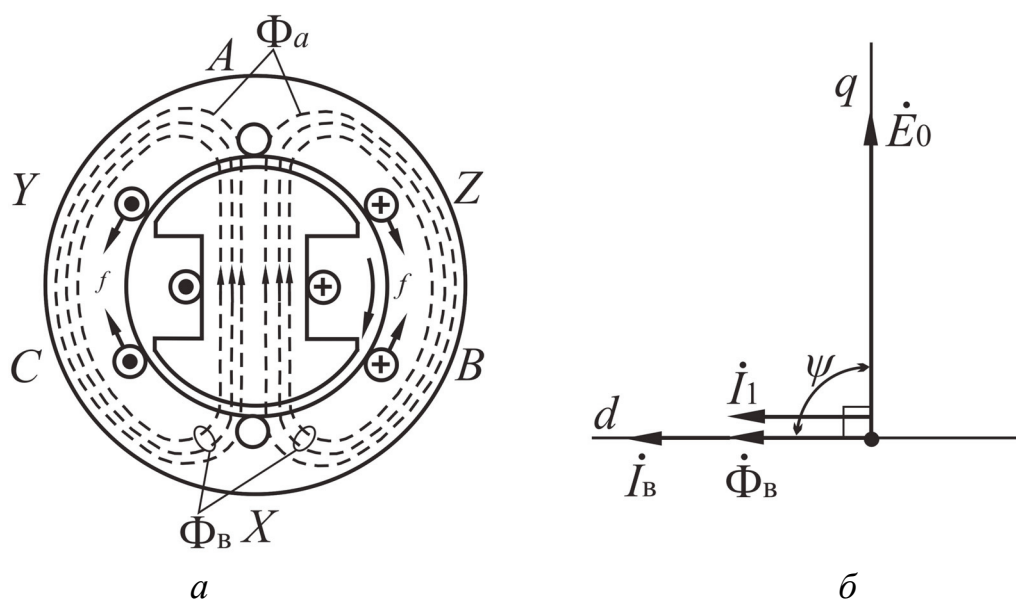


Рис. 6.13. Реакция якоря (а) и векторная диаграмма (б) синхронного генератора при емкостной нагрузке

Реакция якоря и векторная диаграмма, соответствующая рассматриваемому случаю, показаны на рис. 6.14. Здесь максимальный ток имеет место в фазе А, где в этот момент времени ЭДС также максимальна. Магнитное поле, созданное токами якоря, по отношению к оси полюсов является поперечным, т. е. оно ослабляет поле на набегающей половине полюса и усиливает на сбегающей половине полюса. Если магнитная система машины не насыщена (линейна), то поле якоря не изменяет значение магнитного потока, а если насыщена (нелинейна), – уменьшает.

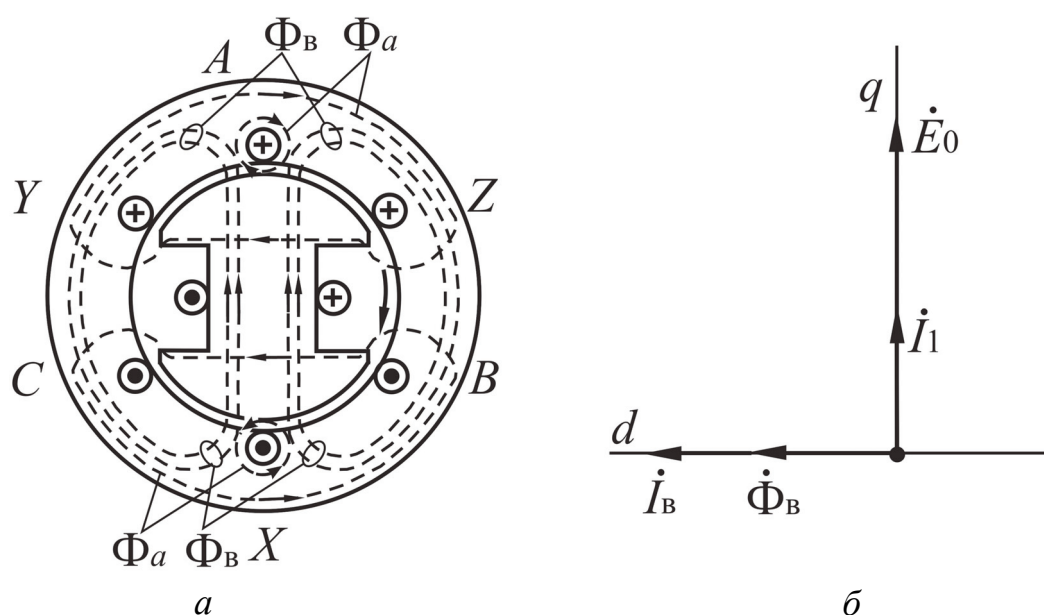


Рис. 6.14. Реакция якоря (а) и векторная диаграмма (б) синхронного генератора при $\psi = 0$

При $\psi = 0$ электромагнитные силы, создаваемые токами, протекающими по обмотке статора, имеют направление в одну сторону, совпадающее с направлением вращения ротора. При этом на ротор действуют такие же по значению силы, но направленные против его вращения, т. е. создающие тормозной электромагнитный момент.

Для компенсации этого момента приводной двигатель должен развивать равный ему механический момент на валу генератора.

В общем случае ток якоря можно разложить на две составляющие (рис. 6.15):

$$\dot{I}_{1d} = \dot{I}_1 \sin\psi; \quad \dot{I}_{1q} = \dot{I}_1 \cos\psi.$$

Одна из этих составляющих тока $\dot{I}_{1q}$, совпадающая по фазе с ЭДС, создает поперечную МДС якоря и называется поперечным током якоря. Другая составляющая $\dot{I}_{1d}$ создает продольную МДС якоря и называется продольным током якоря. Таким образом, в общем случае при нагрузке в машине существуют как продольная, так и поперечная реакция якоря.

Влияние поля якоря было рассмотрено на примере явнополюсного синхронного генератора. Однако полученные результаты в полной мере относятся и к неявнополюсным машинам.

Количественный учет влияния реакции якоря на работу машины производится на основе векторных диаграмм. Обычно с их помощью находят МДС обмотки возбуждения (или ток $\dot{I}_B$), необходимую для обеспечения соответствующего режима работы, который, в свою очередь, определяется током якоря $\dot{I}_1$ при данных значениях $\cos\varphi$ и напряжения на выводах генератора U_1 .

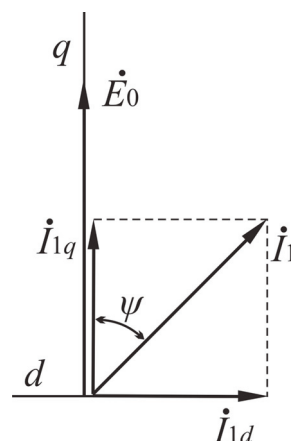


Рис. 6.15. Разложение тока якоря на продольную и поперечную составляющие

6.6. Векторные диаграммы синхронного генератора без учета насыщения

Неявнополюсный генератор. При качественном рассмотрении процессов, происходящих в генераторе, целесообразно использовать более простую векторную диаграмму, построенную без учета насыщения.

При построении такой диаграммы применяется метод наложения, согласно которому можно считать, что в машине существуют два независимых магнитных потока: поток возбуждения и поток якоря. Каждый из этих потоков, в свою очередь, можно разделить на рабочий поток, сцепленный с обеими обмотками, и поток рассеяния, сцепленный лишь с одной из них.

Полный поток возбуждения $\Phi_2 = \Phi_{\text{в}} + \Phi_{\text{в}\sigma}$; полный поток якоря $\Phi_1 = \Phi_a + \Phi_{a\sigma}$. Потоки $\Phi_{\text{в}}$, Φ_a и $\Phi_{a\sigma}$ наводят в обмотке якоря ЭДС соответственно E_0 , E_a и $E_{a\sigma}$. Тогда, исходя из второго правила Кирхгофа, для фазы обмотки якоря можно записать

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{I}_1 Z_{\text{н}} + \dot{I}_1 R_1, \quad (6.3)$$

где $Z_{\text{н}}$ – комплексное сопротивление нагрузки; R_1 – активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Магнитный поток и индуцируемая им ЭДС пропорциональны току якоря:

$$\dot{E} = -j\dot{I}X,$$

где X – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивным сопротивлением.

Тогда входящие в (6.3) ЭДС можно представить в следующем виде:

$$\dot{E} = -j\dot{I}_1 X_a; \dot{E}_{a\sigma} = -j\dot{I}_1 X_{a\sigma}. \quad (6.4)$$

Подставив значения ЭДС из (6.4) в (6.3) и заменив $\dot{I}_1 Z_{\text{н}}$ на $\dot{U}_1$, получим

$$\dot{U}_1 = E_0 - j\dot{I}_1 (X_a + X_{a\sigma}) - \dot{I}_1 R_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 X_c - \dot{I}_1 R_1, \quad (6.5)$$

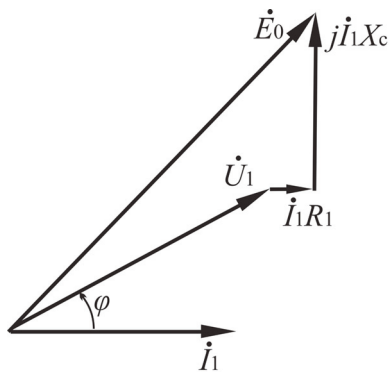


Рис. 6.16. Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора без учета насыщения

где X_a – индуктивное сопротивление реакции якоря; $X_{a\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря; X_c – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря, $X_c = X_{a\sigma} + X_a$.

С учетом (6.5) по заданным U_1 , I_1 и $\cos\varphi$ на рис. 6.16 построена векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора. Ток возбуждения $I_{\text{в}}$, соответствующий определяемой по этой векторной диаграмме ЭДС $\dot{E}_0$, находят по спрямленной характеристике холостого хода (прямой 3 на рис. 6.23).

Параметры неявнополюсных синхронных машин в относительных единицах:

Синхронное индуктивное сопротивление X_c^*	1,2...2,4
Индуктивное сопротивление реакции якоря X_a^*	1,1...2,3
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря $X_{a\sigma}^*$. . .	0,08...0,15
Активное сопротивление обмотки якоря R_1^*	0,002...0,02

При переводе значений параметров машин в относительные единицы за базовое сопротивление принимают отношение номинального фазного напряжения обмотки якоря к ее номинальному фазному току.

Из приведенных значений параметров неявнополюсных синхронных машин следует, что активное сопротивление обмотки якоря очень мало по сравнению с индуктивными сопротивлениями. Поэтому при построении векторных диаграмм вектором $\dot{I}_1 R_1$ обычно пренебрегают.

Явнополюсный генератор. По аналогии с неявнополюсным синхронным генератором можно считать, что в явнополюсном генераторе существуют четыре магнитных потока, индуцирующих ЭДС в обмотке якоря: поток возбуждения Φ_b ; продольный поток реакции якоря Φ_{ad} ; поперечный поток реакции якоря Φ_{aq} и поток рассеяния обмотки якоря $\Phi_{a\sigma}$.

Согласно второму правилу Кирхгофа, для фазы обмотки можно записать следующее уравнение:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 R_1. \quad (6.6)$$

ЭДС E_{ad} , индуцируемая потоком Φ_{ad} , пропорциональна продольному току якоря I_{1d} :

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_{1d}X_{ad}, \quad (6.7)$$

где X_{ad} – индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси.

Аналогичные выражения запишем для остальных ЭДС, входящих в уравнение (6.6):

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_{1q}X_{aq}; \quad \dot{E}_{a\sigma} = -j\dot{I}_1X_{a\sigma}, \quad (6.8)$$

где X_{aq} – индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси;

$X_{a\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Подставив выражения для ЭДС из (6.7) и (6.8) в (6.6), получим

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_{1d}X_{ad} - j\dot{I}_{1q}X_{aq} - j\dot{I}_1X_{a\sigma} - \dot{I}_1 R_1. \quad (6.9)$$

По уравнению (6.9) построим векторную диаграмму явнополюсного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку (рис. 6.17), предположив, что известны I_1 , E_0 , ψ и параметры генератора.

При построении диаграммы ток $\dot{I}_1$ предварительно раскладывается на составляющие $\dot{I}_{1d}$ и $\dot{I}_{1q}$, а затем из $\dot{E}_0$ вычитаются векторы падений напряжения в той последовательности, в какой они записаны в (6.9).

Преобразуем уравнение (6.9), выразив вектор $j\dot{I}_1X_{a\sigma}$ через составляющие тока $\dot{I}_1$:

$$-j\dot{I}_1X_{a\sigma} = j(\dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q})X_{a\sigma}.$$

После преобразования получим

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{E}_0 - j\dot{I}_{1d}(X_{ad} + X_{1\sigma}) - j\dot{I}_{1q}(X_{aq} + X_{1\sigma}) - \dot{I}_1 R_1 = \\ &= j\dot{I}_{1d}X_d - j\dot{I}_{1q}X_q - \dot{I}_1 R_1,\end{aligned}\quad (6.10)$$

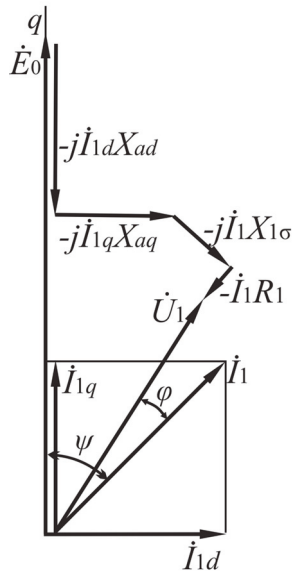


Рис. 6.17. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора без учета насыщения

где X_d – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси; X_q – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси.

Известно, что индуктивное сопротивление пропорционально магнитной проводимости для потока, обуславливающего это сопротивление. Ось продольного потока якоря Φ_{ad} направлена по оси полюсов, где воздушный зазор машины минимальный, а ось поперечного потока Φ_{aq} совпадает с серединой межполюсного пространства, где воздушный зазор имеет максимальное значение. Следовательно, магнитная проводимость для потока Φ_{ad} больше, чем для потока Φ_{aq} . Отсюда такие соотношения между параметрами:

$$X_{ad} > X_{aq}; X_d > X_q.$$

Явнополюсные синхронные машины имеют следующие значения параметров в относительных единицах: $X_d^* = 0,6 \dots 1,5$; $X_q^* = 0,4 \dots 0,9$. Значения параметров $X_{a\sigma}^*$ и R_1^* такие же, как в неявнополюсных машинах.

6.7. Характеристики синхронного генератора

Внешние характеристики представляют собой зависимости напряжения генератора от тока якоря $U_1 = f(I_1)$ при $I_B = \text{const}$, $n = n_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$. Это основные эксплуатационные характеристики генератора, показывающие, как изменяется напряжение U_1 на выводах генератора с ростом тока нагрузки I_1 если ток возбуждения и характер нагрузки остаются неизменными.

Внешние характеристики могут строиться (сниматься) как при увеличении нагрузки, так и при ее уменьшении (рис. 6.18). В первом случае все характеристики выходят из точки $U_1 = U_{1\text{ном}}$, $I_1 = 0$, а во втором – из точки $U_1 = U_{1\text{ном}}$, $I_1 = I_{1\text{ном}}$. Из рис. 6.18. видно, что сильное влияние на вид внешних характеристик оказывает характер нагрузки.

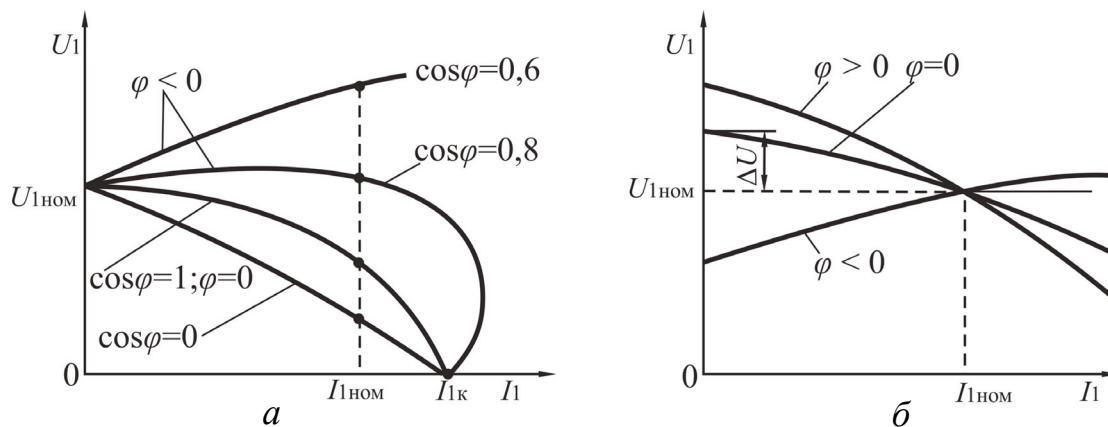


Рис. 6.18. Внешние характеристики синхронного генератора:
а – при увеличении нагрузки; б – при уменьшении нагрузки

При индуктивной нагрузке ($\varphi = 90^\circ$, $\cos \varphi = 0$) реакция якоря продольная размагничивающая, и с ростом тока якоря I_1 напряжение генератора резко уменьшается. Без учета активного сопротивления обмотки якоря R_1 такая внешняя характеристика практически линейна.

При активной нагрузке ($\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$) реакция якоря продольно-поперечная размагничивающая, поэтому с ростом тока I_1 напряжение генератора U_1 также уменьшается. Однако, поскольку продольная составляющая тока якоря I_{1d} в этом случае меньше, чем в предыдущем, то и уменьшение напряжения генератора также будет меньше.

При активно-емкостной нагрузке ($\varphi < 0$) реакция якоря, продольно-поперечная намагничивающая и с ростом тока I_1 напряжение сначала увеличивается, причем его максимальное значение ограничено насыщением магнитной цепи машины. При резонансе напряжений (когда индуктивное сопротивление обмотки якоря равно емкостному сопротивлению нагрузки) ток якоря достигает максимального значения.

При дальнейшем уменьшении емкостного сопротивления нагрузки реакция якоря становится размагничивающей ($X_{\text{обм}} > X_{\text{н}} = X_C$), вследствие чего напряжение и ток I_1 начинают резко уменьшаться.

При коротком замыкании все эти внешние характеристики приходят в одну точку ($U_1 = 0$, $I_1 = I_{1к}$), (см. рис. 6.18, а).

Если нагрузка является смешанной, например, активно-индуктивной, то внешние характеристики проходят между соответствующими крайними ее вариантами ($\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$).

Семейство внешних характеристик, показанное на рис. 6.18, б, снимается при уменьшении нагрузки – тока I_1 . Эти зависимости имеют характер, обратный характеру зависимостей, показанных на рис. 6.18, а, т. е. напряжение U_1 увеличивается при уменьшении активной и индуктивной нагрузок и уменьшается при уменьшении емкостной нагрузки. По этим характеристикам можно определить изменение напряжения генератора (в относительных единицах) при сбросе нагрузки:

$$\Delta U^* = \Delta U / U_{\text{ном}} = (E_0 - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}}.$$

Для определения нормального изменения напряжения:

$$\Delta U_{\text{ном}} = (E_0 - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}}$$

внешняя характеристика должна сниматься для $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{ном}}$.

Регулировочные характеристики представляют собой зависимости тока возбуждения от тока нагрузки якоря, т. е. $I_b = f(I_1)$ при $n = n_1 = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $U_1 = \text{const}$. Эти характеристики определяют закон изменения тока возбуждения синхронного генератора, который необходим для поддержания напряжения на выводах машины неизменным при изменяющемся токе нагрузки и неизменном ее характере ($\cos\varphi = \text{const}$).

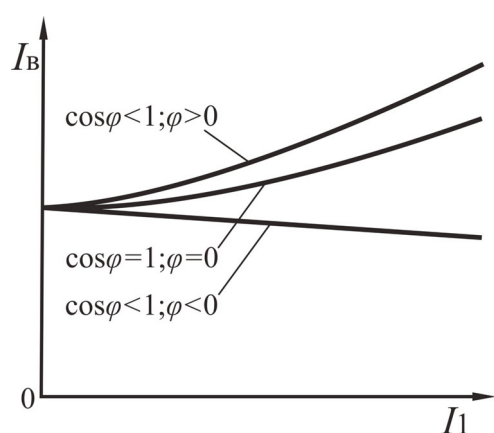


Рис. 6.19. Регулировочные характеристики синхронного генератора для разных значений $\cos\varphi$

Регулировочные характеристики обратны внешним характеристикам. На рис. 6.19 приведены регулировочные характеристики генератора для различных значений коэффициента мощности. При индуктивном ($\varphi = 90^\circ$) и активном ($\varphi = 0$) характере нагрузки в машине существует продольная размагничивающая реакция якоря. Чтобы сохранить напряжение U_1 постоянным с ростом нагрузки (тока якоря I_1), необходимо компенсировать это размагничивающее действие увеличением тока возбуждения. Зависимости $I_b = f(I_1)$ при $\cos\varphi = 0$ ($\varphi = 90^\circ$) и $\cos\varphi = 1$ ($\varphi = 0$) возрастающие. При

емкостной нагрузке $\cos\varphi = 0$, ($\varphi = -90^\circ$) реакция якоря продольная намагничивающая и для сохранения напряжения U_1 неизменный ток возбуждения необходимо уменьшать. Регулировочная характеристика в данном случае имеет падающий характер.

Характеристика короткого замыкания. Характеристика трехфазного короткого замыкания представляет собой зависимость тока обмотки якоря при коротком замыкании от тока возбуждения, т. е. $I_{1к} = f(I_b)$ при неизменной частоте вращения ротора $n = n_1 = \text{const}$.

Из-за относительно малого активного сопротивления R_1 обмотка якоря синхронной машины обладает практически только индуктивным сопротивлением. Следовательно, ток якоря при симметричном трехфазном коротком замыкании отстает от ЭДС на 90° и является чисто продольным, т. е. $I_{1к} = I_{ld}$. Этот ток создает в машине продольную размагничивающую

реакцию якоря (рис. 6.20). При коротком замыкании $\dot{U}_1 = 0$, т. е. при $R_1 = 0$ уравнение (6.10) преобразуется к виду

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_{1к}X_d. \quad (6.11)$$

Поскольку при коротком замыкании машина ненасыщена, то зависимости $E_0 = f(I_{1к})$ и $E_0 = f(I_B)$ линейные и, следовательно, зависимость $I_{1к} = f(I_B)$ также носит линейный характер. Характеристика трехфазного короткого замыкания синхронного генератора приведена на рис. 6.21 (прямая 1).

Следует отметить, что кроме симметричного трехфазного короткого замыкания возможны и несимметричные – двухфазное и однофазное (рис. 6.22).

В случае двухфазного короткого замыкания ток $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_{1к}$, а ток $\dot{I}_C = 0$. Обмотка якоря создаёт пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на прямо- и обратнорастающие поля с половинной амплитудой. При этом прямое поле неподвижно относительно ротора и создает размагничивающую реакцию якоря, а обратное поле вращается относительно ротора с двойной синхронной скоростью. Поскольку при неизменном токе $I_{1к}$ МДС двухфазной обмотки существенно меньше МДС трехфазной обмотки, то и размагничивание в этом случае будет слабее, чем при трехфазном замыкании. Следовательно, магнитный поток в машине и ток короткого замыкания будут больше при неизменном токе возбуждения.

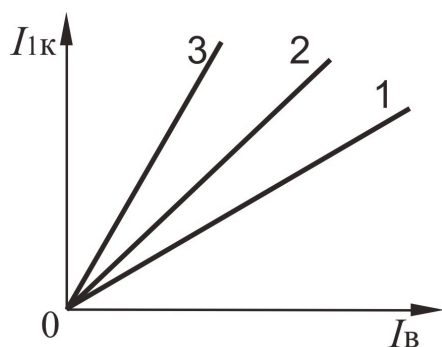


Рис. 6.21. Характеристики короткого замыкания синхронного генератора:
1 – трехфазного; 2 – двухфазного;
3 – однофазного

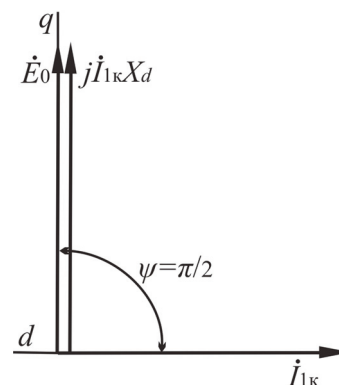


Рис. 6.20. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора при коротком замыкании

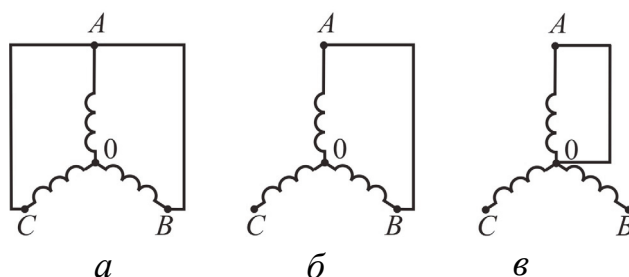


Рис. 6.22. Схемы короткого замыкания:
а – трехфазного; б – двухфазного; в – однофазного

В случае однофазного короткого замыкания МДС обмотки якоря и размагничивание еще меньше, чем при двухфазном коротком замыкании, что, в свою очередь, обуславливает еще больший ток $I_{1к}$. Поскольку при всех типах короткого замыкания машина размагничивается, все характеристики короткого замыкания имеют линейный характер (см. рис. 6.21).

По характеристикам трехфазного короткого замыкания и холостого хода, полученным опытным путем, можно определить ненасыщенное значение индуктивного сопротивления X_d и отношение короткого замыкания.

Согласно (6.11),

$$X_d = E_0 / I_{1к}. \quad (6.12)$$

Для расчета X_d строим на одном графике характеристику холостого хода 1 и характеристику трехфазного короткого замыкания 2, как показано на рис. 6.23. Затем, проводя касательную из начала координат к характеристике холостого хода 3. Для ЭДС холостого хода, обычно соответствующей номинальному напряжению $U_{1ном}$ (отрезку AC), по спрямленной характеристике холостого хода 3 находим соответствующий ей ток возбуждения (отрезок OC). Для этого тока возбуждения по характеристике трех-

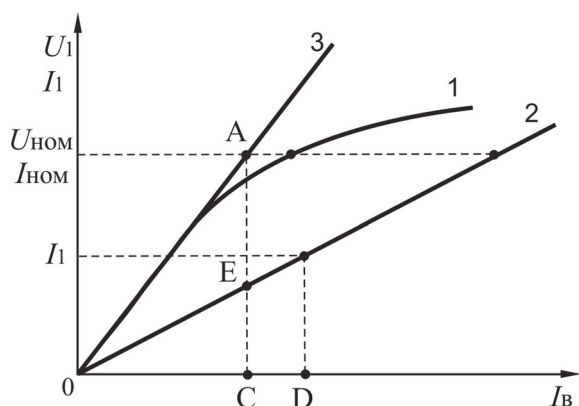


Рис. 6.23. Графические построения для определения индуктивного сопротивления X_d :

- 1 — характеристика холостого хода;
- 2 — характеристика трехфазного короткого замыкания;
- 3 — спрямленная характеристика холостого хода

фазного короткого замыкания 2 определяем соответствующий ток $I_{1к}$ (отрезок EC). Далее, подставив полученные значения E_0 и $I_{1к}$ в выражение (6.12), находим ненасыщенное значение X_d .

Отношением короткого замыкания (ОКЗ) называется отношение тока короткого замыкания $I_{1к}$, соответствующего току возбуждения, при котором в режиме холостого хода ЭДС E_0 равна номинальному напряжению $U_{1ном}$, к номинальному току якоря:

$$\text{ОКЗ} = I_{1к} / I_{1ном} = I_{к}^*. \quad (6.13)$$

Ток $I_{1к}$ определяют по рис. 6.23 следующим образом. Сначала по спрямленной характеристике холостого хода 3 находят ток возбуждения (отрезок OC), при котором $E_0 = U_{1ном}$ (отрезок AC). Затем по характеристике короткого замыкания 2 определяют соответствующий этому току возбуждения ток короткого замыкания $I_{1к}$ (отрезок EC). Подставив полученное значение тока $I_{1к}$ в уравнение (6.13), находят значение ОКЗ. Поскольку $X_d = AC/EC$, а $\text{ОКЗ} = EC/AC$, то можно сделать вывод, что отношение короткого замыкания обратно пропорционально значению X_d .

В гидрогенераторах $\text{ОКЗ} \approx 1...1,4$, а в турбогенераторах $\text{ОКЗ} \approx 0,5...0,7$.

Индукционная нагрузочная характеристика представляет собой зависимость $U_1 = f(I_B)$ при $I_1 = \text{const}$, $n = n_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi = 0$. Эта характеристика показывает, как изменяется напряжение генератора U_1 с изменением тока возбуждения I_B при условии постоянства тока I_1 в индуктивной нагрузке (при $\cos\varphi = 0$). Обычно индукционную нагрузочную характеристику снимают при $I_1 = I_{1\text{ном}}$, используя в качестве нагрузки реактор или катушку с переменной индуктивностью. Так как эти индуктивные элементы обладают определенным активным сопротивлением, они не могут обеспечить выполнение условия $\cos\varphi = 0$. Опыт показывает, что эта характеристика близка к истинной, если $\cos\varphi \leq 0,2$.

Индукционная нагрузочная характеристика представлена на рис. 6.24 (кривая 2). Точку D этой характеристики нельзя получить экспериментально, так как при $U_1 = 0$ ток $I_1 = 0$.

Однако ее можно найти по характеристике трехфазного короткого замыкания. Для этого по оси ординат (см. рис. 6.23) необходимо отложить ток I_1 , при котором снималась нагрузочная характеристика. Соответствующий току I_1 ток возбуждения (0D) равен току I_B в точке D индукционной нагрузочной характеристики. На рис. 6.24 изображена также характеристика холостого хода (кривая 1). Так как ток I_1 при $\cos\varphi \approx 0$ является практически реактивным (т. е. $I_1 = I_{ld}$), то реакция якоря в этом случае будет продольной размагничивающей. Вследствие этого, а также из-за падения напряжения в цепи якоря нагрузочная характеристика проходит ниже характеристики холостого хода.

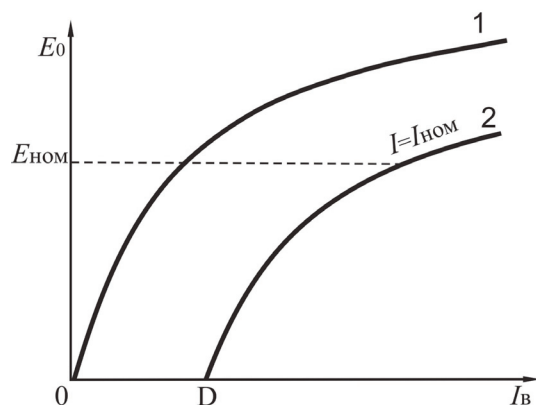


Рис. 6.24. Индукционная нагрузочная характеристика (2) и характеристика холостого хода (1) синхронного

6.8. Регулирование активной мощности

При параллельной работе с общей электрической сетью мощности отдельных синхронных генераторов по сравнению с общей мощностью энергосистемы незначительны. Поэтому при любых изменениях режима работы отдельного генератора, включенного в энергосистему, ее напряжение $\dot{U}_c$ и частота f_c остаются практически неизменными и поддерживаются всеми остальными генераторами.

Активную мощность генератора, работающего параллельно с сетью, при принятых допущениях ($\dot{U}_c = \text{const}$, $f_c = \text{const}$) можно регулировать посредством изменения вращающего момента на его валу. Изменение вращающего момента достигается воздействием на двигатель, приводящий генератор во вращение. Активная мощность, отдаваемая генератором в сеть:

$$P_2 = P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{эл1}} - \Delta P_{\text{м1}} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi,$$

где $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность генератора; $\Delta P_{\text{эл1}}$ – электрические потери в обмотке якоря; $\Delta P_{\text{м1}}$ – магнитные потери в сердечнике якоря.

Если пренебречь электрическими (что допустимо для машин большой и средней мощностей, сопротивление R_1 которых относительно мало) и магнитными потерями, можно записать

$$P_{\text{эм}} \approx P_2 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi. \quad (6.14)$$

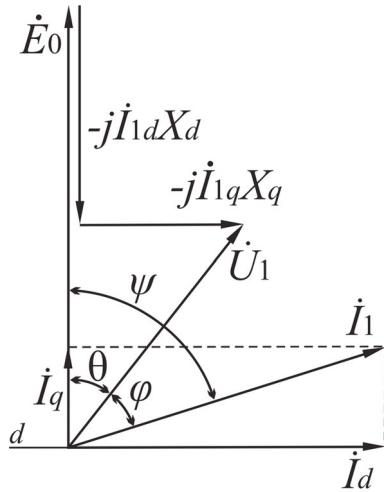


Рис. 6.25. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора при $R_1 = 0$

При исследовании параллельной работы синхронного генератора с сетью удобно электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$ выразить через параметры машины и угол, характеризующий положение ротора относительно результирующего магнитного поля. Для этого используют векторную диаграмму явнополюсного синхронного генератора, представленную на рис. 6.25, которая получена из диаграммы, приведенной на рис. 6.17 при $R_1 = 0$. В соответствии с рис. 6.25 можно записать следующие уравнения электрического равновесия по осям симметрии d и q :

$$\begin{aligned} U_1 \sin \theta &= I_{1q} X_q; \\ U_1 \cos \theta + I_{1q} X_q &= E_0. \end{aligned}$$

Из уравнений (6.6) получим выражения для составляющих тока якоря:

$$\begin{aligned} I_{1q} &= U_1 \sin \theta / X_q; \\ I_{1d} &= (E_0 - U_1 \cos \theta) / X_d. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Поскольку угол $\psi = \varphi + \theta$, уравнение (6.14) можно представить в виде $P_{\text{эм}} = m_1 U_1 I_1 \cos(\psi - \theta) = m_1 U_1 (I_{1q} \cos \theta + I_{1d} \sin \theta)$.

После подстановки в это уравнение значений токов из (6.15) получим

$$P_{\text{эм}} = m_1 U_1 [U_1 \sin \theta \cos \theta / X_q + (E_0 - U_1 \cos \theta) \sin \theta / X_d] = \\ = m_1 U_1 E_0 \sin \theta / X_d + (m_1 U_1^2 / 2) (1/X_q - 1/X_d) \sin 2\theta. \quad (6.16)$$

Так как индуктивные сопротивления по осям неявнополусной синхронной машины равны ($X_d = X_q = X_c$), уравнение (6.16) для нее приобретает вид:

$$P_{\text{эм}} = m_1 U_1 E_0 \sin \theta / X_c. \quad (6.17)$$

Угол θ является углом между временными векторами $\dot{E}_0$ и $\dot{U}_1$. В то же время согласно уравнениям (6.16) и (6.17), чтобы изменить электромагнитную мощность генератора, а следовательно, и активную мощность, отдаваемую им в сеть, необходимо изменить угол θ . Так как угол θ определяет активную мощность синхронной машины, работающей параллельно с сетью, его называют углом нагрузки. Зависимость $P_{\text{эм}} = f(\theta)$ при $U_1 = \text{const}$, $I_b = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ называется угловой характеристикой активной мощности, а зависимость электромагнитного момента $M = f(\theta)$ – угловой характеристикой электромагнитного момента.

Электромагнитный момент

$$M = P_{\text{эм}} / \omega_1,$$

где ω_1 – угловая синхронная скорость, с^{-1} , $\omega_1 = 2\pi f/p$.

Электромагнитная мощность в соответствии с уравнением (6.16) имеет две составляющие, из которых первая $P'_{\text{эм}} = m_1 U_1 E_0 \sin \theta / X_d$, зависящая как от напряжения U_1 , так и от ЭДС E_0 , создаваемой потоком возбуждения (а следовательно, током возбуждения), а вторая $P''_{\text{эм}} = (m_1 U_1^2 / 2) (1/X_q - 1/X_d) \sin 2\theta$, не зависящая от тока возбуждения машины, возникает вследствие различия синхронных индуктивных сопротивлений по продольной (X_d) и поперечной (X_q) осям. Момент, определяемый этой составляющей мощности, называют **реактивным**.

За счет второй составляющей электромагнитной мощности явнополусный генератор может работать параллельно с сетью при отсутствии тока возбуждения, т. е. когда $E_0 = 0$. В этом случае магнитный поток машины создается только обмоткой якоря. При номинальном возбуждении машины амплитуда второй составляющей электромагнитной мощности (момента) равна 20...35 % амплитуды основной (первой) ее составляющей.

На рис. 6.26 показаны две составляющие и результирующая кривая активной мощности, т. е. угловые характеристики активной мощности явнополусного синхронного генератора. Они же в другом масштабе являются угловыми характеристиками электромагнитного момента $M = f(\theta)$. Из этого рисунка следует, что максимальную мощность (момент) явнополусный генератор развивает при угле нагрузки $\theta < 90^\circ$.

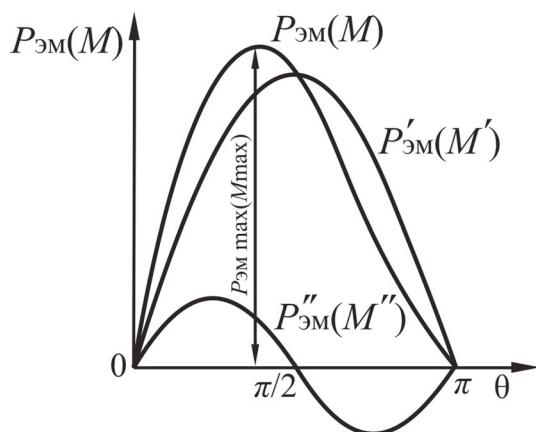


Рис. 6.26. Угловые характеристики электромагнитной мощности (момента) явнополюсного синхронного генератора

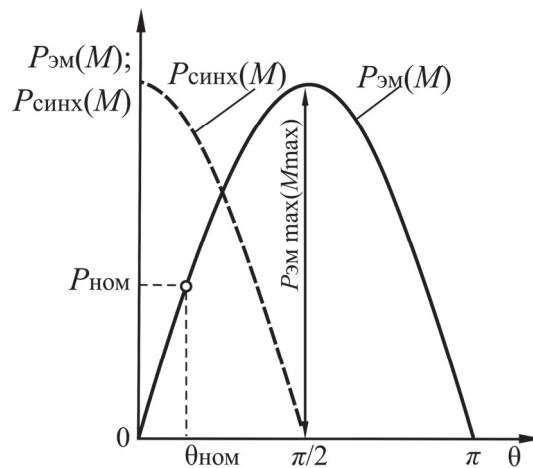


Рис. 6.27. Угловые характеристики электромагнитной мощности (момента) явнополюсного синхронного генератора

На рис. 6.27 представлена угловая характеристика активной мощности неявнополюсного синхронного генератора, соответствующая уравнению (6.17). Из рисунка видно, что угловые характеристики неявнополюсного синхронного генератора имеют синусоидальный характер. Номинальным значениям мощности и момента соответствует угол $\theta_{\text{ном}} = 20 \dots 30^\circ$. Максимальную мощность (момент) неявнополюсный генератор развивает при угле нагрузки: $\theta = \pi/2 (\sin \theta = 1)$:

$$P_{\text{max}} = m_1 U_1 E_0 / X_c,$$

$$M_{\text{max}} = m_1 U_1 E_0 / X_c \omega_1.$$

Статическая перегружаемость синхронного генератора (т. е. предельно возможная кратность перегрузки при медленном увеличении внешнего момента) определяется как отношение максимальной мощности P_{max} при $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и ЭДС E_0 , соответствующей номинальному току возбуждения $I_{\text{в.ном}}$, к номинальной мощности $P_{\text{ном}}$:

$$k_{\text{п}} = P_{\text{max}} / P_{\text{ном}}.$$

Согласно ГОСТ 533-2000, статическая перегружаемость неявнополюсных турбогенераторов мощностью до 160 МВт $k_{\text{п}} \geq 1,7$, а при мощностях до 800 МВт и более $k_{\text{п}} \geq 1,5$. Согласно ГОСТ 5616-89, статическая перегружаемость явнополюсных генераторов $k_{\text{п}} \geq 1,5$.

6.9. Статическая устойчивость

Угол нагрузки θ зависит от момента приводного двигателя M_2 . Соответствующая моменту M_2 прямая пересекает угловую характеристику электромагнитного момента в двух точках (точки возможного равновесия): 1 – при значении θ_1 и 2 – при значении θ_2 (рис. 6.28).

Рассмотрим работу генератора в точке 1. Пусть момент приводного двигателя M_2 по каким-то причинам уменьшился до значения M_{21} . По закону инерции угол θ скачком изменится не может и остается равным θ_1 , поэтому сначала $M > M_2$. При таком соотношении моментов ротор генератора начнет тормозиться и угол нагрузки будет уменьшаться. В момент, когда угол θ станет равным θ'_1 , момент M_2 восстановит свое первоначальное значение, т. е. в точке 1' соотношение между моментами изменится ($M_2 > M$), и ротор начнет ускоряться, а угол θ расти. В точке 1 моменты станут равны, и ротор возвратится в исходное положение. Иными словами, точка 1 статически устойчивая. Направление изменения угла нагрузки показано на рис. 6.28 стрелками.

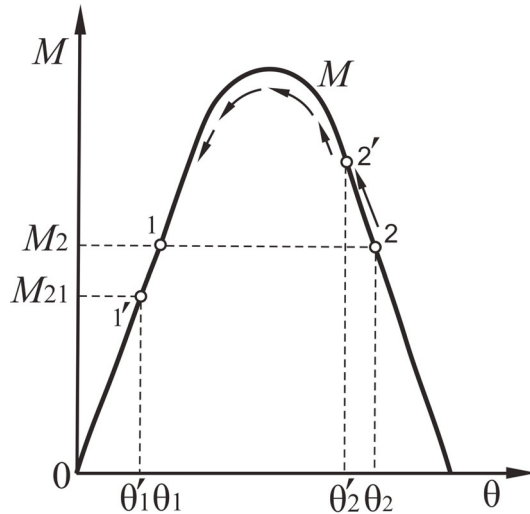


Рис. 6.28. К расчету статической устойчивости неявнополюсного синхронного генератора:

- 1 – статически устойчивая точка;
- 2 – статически неустойчивая точка

Иное положение возникает при работе генератора в точке 2. Предположим, как и в предыдущем случае, что момент M_2 уменьшился. При этом угол нагрузки также уменьшится, поскольку ротор генератора начнет тормозиться. В момент, когда угол θ станет равным θ'_2 (точка 2'), момент M_2 восстановит свое первоначальное значение. Однако в этой точке электромагнитный момент по-прежнему будет больше момента приводного двигателя M_2 , и ротор будет продолжать тормозиться (а угол θ уменьшаться), пока в точке 1 не восстановится равенство моментов ($M_2 = M$). Таким образом, точка 2 является статически неустойчивой.

Условия устойчивой работы генератора можно записать в виде

$$\partial M / \partial \theta > 0; \partial P_{эм} / \partial \theta > 0.$$

Иными словами, область угловой характеристики при углах $0 \leq \theta < 90^\circ$ является статически устойчивой, а область при $\theta > 90^\circ$ – статически неустойчивой. Для явнополюсных синхронных генераторов границей разделе-

ния этих областей является угол θ , при котором M достигает максимального значения $M_{\max}$.

Продифференцируем уравнение (6.17) по углу θ :

$$P_{\text{синх}} = \partial P_{\text{эм}} / \partial \theta = (m_1 U_1 E_0 / X_c) \cos \theta ;$$

$$M_{\text{синх}} = (m_1 U_1 E_0 / X_c \omega_1) \cos \theta .$$

Удельная синхронизирующая мощность $P_{\text{синх}}$ и удельный синхронизирующий момент $M_{\text{синх}}$, показанные на рис. 6.27, характеризуют способность машины удерживаться в синхронизме при той или иной нагрузке. Так, при холостом ходе ($\theta = 0$) $P_{\text{синх}}$ и $M_{\text{синх}}$ имеют наибольшее значение, т. е. в этом случае машина работает наиболее устойчиво. При $\theta = \pi/2$ синхронизирующие мощность и момент равны нулю и способность машины к восстановлению синхронной работы отсутствует.

В соответствии с (6.16) синхронизирующие мощность и момент явнополюсного генератора можно определить по формулам

$$P_{\text{синх}} = (m_1 U_1 E_0 / X_d) \cos \theta + m_1 U_1^2 (1/X_q - 1/X_d) \cos 2\theta ;$$

$$M_{\text{синх}} = (m_1 U_1 E_0 / \omega_1 X_d) \cos \theta + m_1 U_1^2 (1/X_q - 1/X_d) \cos 2\theta / \omega_1 .$$

6.10. Регулирование реактивной мощности

Реактивная мощность синхронного генератора, работающего параллельно с сетью при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $P = \text{const}$, регулируется изменением тока в обмотке возбуждения.

Рассмотрим параллельную работу неявнополюсного синхронного генератора с сетью при $P = 0$. После включения генератора в сеть методом точной синхронизации его напряжение $\dot{U}_r = -\dot{E}_r$ уравнивает напряжение сети $\dot{U}_c$, при этом $\Delta \dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_c = 0$ (рис. 6.29, а). Ток в цепи якоря $\dot{I}_1$ также равен нулю. Если теперь увеличить ток возбуждения (перевозбудить машину), то ЭДС E_0 и напряжение $\dot{U}_r$ возрастут, а $\Delta \dot{U} \neq 0$. Под действием разности напряжений $\Delta \dot{U}$ в цепи якоря возникнет ток $\dot{I}_1 = -j \Delta \dot{U} / X_c$ (рис. 6.29, б), который будет отставать от $\Delta \dot{U}$ на угол 90° и опережать напряжение сети $\dot{U}_c$ на тот же угол. При этом токе электромагнитная мощность $P_{\text{эм}} = 0$ ($\theta = 0$) и генератор вырабатывают только реактивную мощность, которую отдает в сеть. С ростом тока возбуждения (и ЭДС E_0) будут увеличиваться разность напряжений ΔU и ток якоря I_1 .

Если после точной синхронизации, т. е. при $\Delta \dot{U} = 0$ (см. рис. 6.29, а), уменьшать ток возбуждения (недовозбудить машину), то ЭДС E_0 и напряжение U_r будут уменьшаться, а вектор $\Delta \dot{U}$ изменит свое направление

(см. рис. 6.29, в). Следовательно, ток якоря $\dot{I}_1$, отставая от $\Delta \dot{U}$ на угол 90° , будет отставать от напряжения сети $\dot{U}_c$ на угол 90° . При этом реактивная мощность изменит свое направление и будет потребляться генератором из сети. При дальнейшем уменьшении тока возбуждения разность напряжений будет увеличиваться, а ток якоря – возрастать.

Таким образом, изменение тока возбуждения генератора вызывает лишь изменение реактивной составляющей тока якоря. При перевозбуждении генератор работает с отстающим от напряжения генератора $\dot{U}_r$ током, а при недовозбуждении – с опережающим.

Рост реактивной составляющей тока якоря при изменении тока возбуждения I_B происходит не только при холостом ходе, но и при активной нагрузке генератора. Рассмотрим три векторные диаграммы неявнополюсного генератора с ненасыщенной магнитной системой, показанные на рис. 6.30. Примем активную нагрузку генератора постоянной и равной $P = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi = \text{const}$. Из диаграмм видно, что при $U_1 = \text{const}$ и $I_1 \cos \varphi = I_{1a} = \text{const}$ геометрическим местом концов векторов тока является прямая CD, перпендикулярная вектору $\dot{U}_1$. Одна из диаграмм, показанных на рисунке, соответствует $\cos \varphi = 1$ ($\varphi = 0$). В этом случае при заданной мощности P ток генератора $\dot{I}_{1(1)}$ минимальный и чисто активный. Этому току на векторной диаграмме соответствует ЭДС $\dot{E}_{0(1)}$. Вторая диаграмма построена для отстающего тока $\dot{I}_{1(2)}$, которому соответствует ЭДС $\dot{E}_{0(2)}$, причем $E_{0(2)} > E_{0(1)}$. Следовательно, ток возбуждения, соответствующий этой ЭДС, $I_{B(2)} > I_{B(1)}$. Третья диаграмма построена при опережающем токе $\dot{I}_{1(3)}$, для которого $E_{0(3)} < E_{0(1)}$, откуда $I_{B(3)} < I_{B(1)}$.

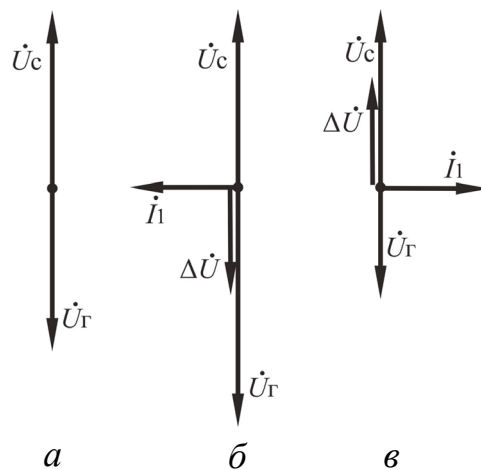


Рис. 6.29. Упрощенные векторные диаграммы, характеризующие регулирование реактивной мощности неявнополюсного синхронного генератора

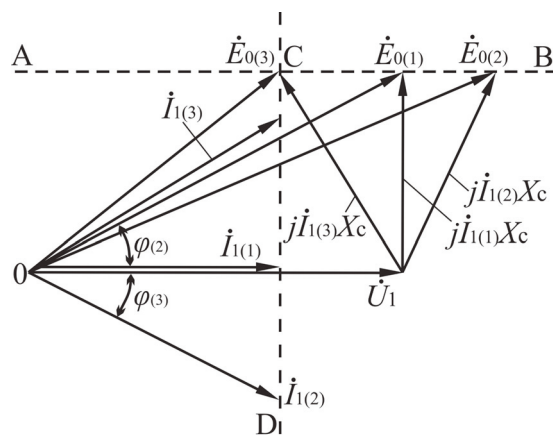


Рис. 6.30. Обобщенные векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора с ненасыщенной магнитной системой при $P = \text{const}$

В генераторе с ненасыщенной магнитной системой концы векторов ЭДС лежат на одной прямой АВ, так как

$$P = P_2 \approx P_{эм} = (m_1 U_1 E_0 / X_c) \sin \theta = \text{const}$$

и, следовательно, $E_0 \sin \theta = \text{const}$.

По векторным диаграммам, приведенным на рис. 6.30, можно построить U-образные характеристики неявнополюсного синхронного генератора, представляющие собой зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_1 = f(I_B)$ при $P = \text{const}$, $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ (рис. 6.31). Точки минимума этих характеристик соответствуют активному току якоря $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1a}$ и $\cos \varphi = 1$. С ростом активной мощности P точка минимума перемещается

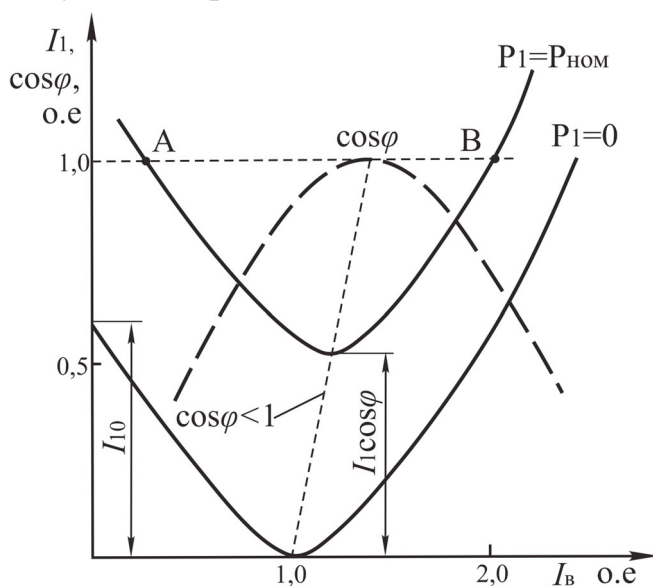


Рис. 6.31. U-образные характеристики неявнополюсного синхронного генератора

вправо в сторону больших токов возбуждения (на рисунке показано штриховой линией). Это объясняется тем, что при активной нагрузке реакция якоря продольно-поперечная размагничивающая, т. е. при увеличении тока $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1a}$ растет размагничивающее действие реакции якоря, и для его компенсации требуется увеличение тока I_B .

Для явнополюсных синхронных генераторов U-образные характеристики имеют аналогичный вид.

Линия $\cos \varphi = 1$ разделяет U-образные характеристики на две области. Слева от этой линии находятся область недовозбуждения, при работе в которой генератор потребляет из сети реактивную мощность, справа – область перевозбуждения, при работе в которой генератор отдает реактивную мощность в сеть.

Как видно из рис. 6.31, номинальной мощности $P_{ном}$ и току $I_{1ном}$ ($I_l^* = 1$) соответствуют две точки на U-образной характеристике – точки А и В. Точка А соответствует работе синхронного генератора в режиме потребления реактивной мощности (в режиме недовозбуждения), а точка В – в режиме генерирования реактивной мощности (в режиме перевозбуждения). При проектировании генераторов в качестве расчетного (номинального) режима принимается режим работы в точке В как более тяжелый. Действительно, при неизменных потерях в статоре электрические потери в роторе в этом случае оказываются больше и тепловой режим машины при работе в точке В оказывается более напряженным, чем при работе в точке А.

6.11. Синхронные двигатели

Как и всякая электрическая машина, синхронная машина обладает свойством обратимости, т. е. она может работать не только в режиме генератора, но и в режиме двигателя. В этом случае трехфазная обмотка статора получает питание от сети с напряжением U_c и частотой f_1 и создает круговое вращающееся поле $n_1 = 60f_1/p$. Обмотка возбуждения получает питание от источника постоянного тока и создает поле ротора (число пар полюсов статора и ротора одинаково). Возникающий в результате взаимодействия вращающегося поля якоря и поля возбуждения электромагнитный момент увлекает за собой ротор. При холостом ходе (рис. 6.32, а) двигателя угол θ (угол между осью полюсов ротора и осью результирующего магнитного поля) равен нулю (потери в машине пренебрегаем). При появлении нагрузки на ротор двигателя действует тормозной момент, поэтому ротор, продолжая вращаться синхронно, смещается относительно результирующего поля машины на угол θ (рис. 6.32, б). Чем больше нагрузка на валу, тем больше угол θ . Однако в отличие от генераторов, где ротор опережает поле якоря, в двигателях ротор отстает от него, т. е. является ведомым, поэтому для двигателей этот угол принимают отрицательным.

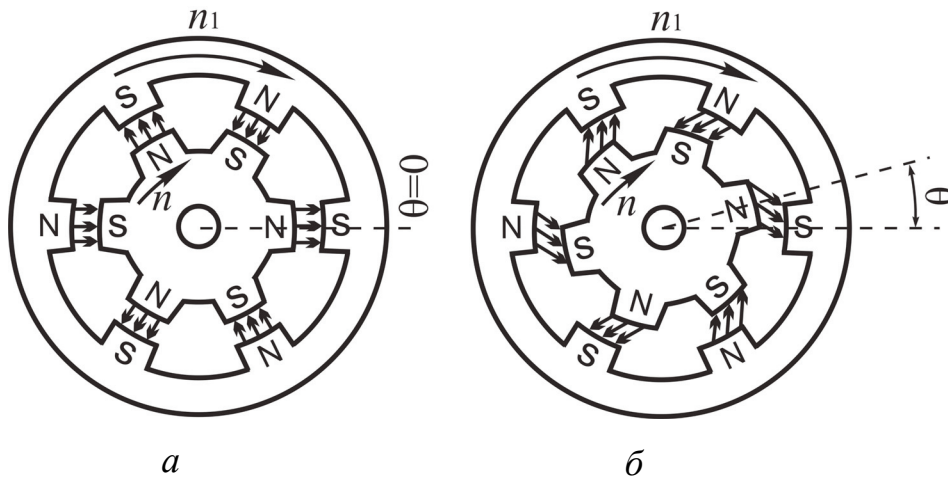


Рис. 6.32. К принципу действия синхронного двигателя:
а – холостой ход; б – под нагрузкой

На рис. 6.33 представлены две векторные диаграммы, одна из которых соответствует генераторному режиму работы машины, а другая – двигательному. В первом случае ротор опережает результирующее поле ($\vec{E}_0$ опережает $\vec{U}_{1r}$), а во втором отстает от него ($\vec{E}_0$ отстает от $\vec{U}_{1d}$). Под $\vec{U}_{1r}$ и $\vec{U}_{1d}$ понимаются напряжения на выводах соответственно синхронного генератора и синхронного двигателя, уравнивающие напряжение сети (см. рис. 6.33). Поэтому $\vec{U}_{1d} = -\vec{U}_c$ и $\vec{U}_{1r} = -\vec{U}_c$.

Как показано на рис. 6.33, б, в соответствии с изменением фазы напряжения ΔU изменяется фаза тока $\dot{I}_1$ и активная мощность, отдаваемая машиной в сеть, становится отрицательной:

$$m_1 U_{1д} I_1 \cos \varphi_d < 0,$$

а мощность, потребляемая из сети, – положительной:

$$m_1 U_c I_1 \cos \varphi_c > 0.$$

Эти неравенства подтверждают, что при $\theta < 0$ машина является двигателем, т. е. преобразует электрическую энергию в механическую. При построении векторных диаграмм синхронных двигателей принято фазу тока определять по отношению к вектору напряжения сети U_c . Построение векторной диаграммы синхронного двигателя при известных значениях $U_{1д}$ и I_1 и угла сдвига между ними производится так же, как и для генератора, исходя из уравнения

$$\dot{U}_r = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 X_{\sigma 1} - j\dot{I}_{1q} X_{aq} - j\dot{I}_{1d} X_{ad}. \quad (6.18)$$

Причем здесь так же, как и для генератора, принимается, что активное сопротивление обмотки якоря $R_1 = 0$.

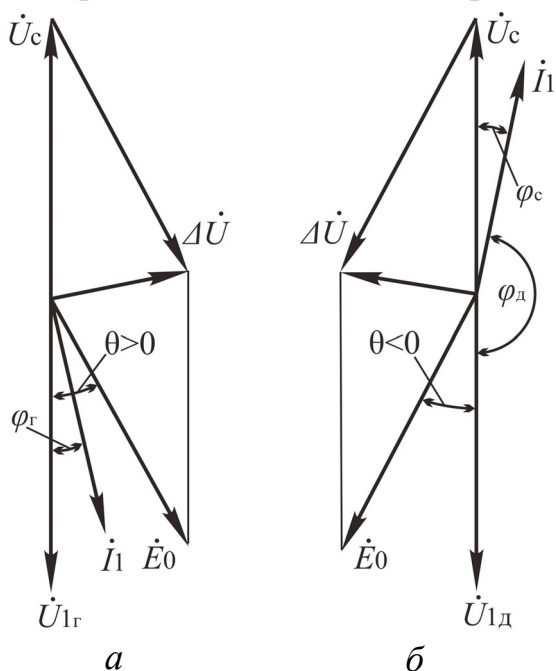


Рис. 6.33. Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины:
а – генераторный режим;
б – двигательный режим

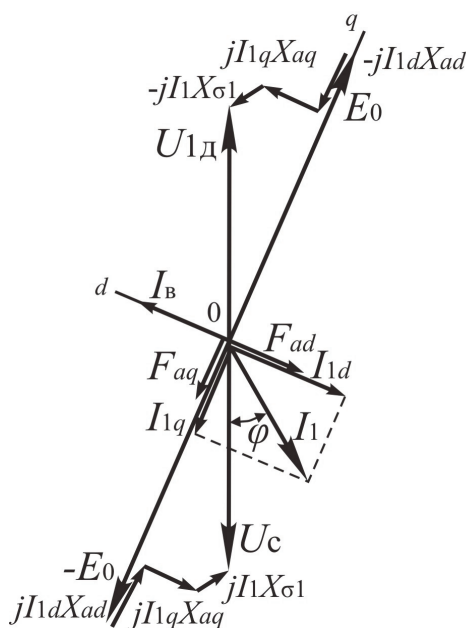


Рис. 6.34. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного двигателя

Если при построении диаграммы исходить из известного напряжения сети $\dot{U}_c$, то уравнение (6.18) будет иметь вид:

$$\dot{U}_c = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_1 X_{\sigma 1} + j\dot{I}_{1q} X_{aq} + j\dot{I}_{1d} X_{ad}. \quad (6.19)$$

Диаграммы, соответствующие уравнениям (6.18) и (6.19), для опережающего тока якоря (режима перевозбуждения) показаны на рис. 6.34. Из рисунка видно, что продольная реакция якоря в синхронном двигателе при опережающем токе действует размагничивающим образом (так как вектор $\dot{F}_{ad}$ направлен против вектора $\dot{F}_B$).

Аналогично можно показать, что при отстающем токе продольная реакция якоря оказывает намагничивающее действие.

6.12. Угловые и U-образные характеристики синхронного двигателя

Синхронный двигатель потребляет электрическую мощность P_1 из сети. Часть этой мощности расходуется на электрические потери в обмотке якоря $\Delta P_{эл1}$ и магнитные потери в стали якоря $\Delta P_{м1}$, оставшаяся часть – электромагнитная мощность $P_{эм}$ – передается вращающимся магнитным полем на ротор:

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{м1}.$$

Частично мощность $P_{эм}$ расходуется на покрытие механических $\Delta P_{мех}$ и добавочных $\Delta P_{доб}$ потерь, оставшаяся же ее часть P_2 является полезной механической мощностью на валу двигателя.

Уравнения для электромагнитной мощности синхронного двигателя можно получить из векторных диаграмм. Если пренебречь потерями в статоре ($\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{м1}$), то для двигателя с независимой системой возбуждения будут справедливы те же выражения, что и для генератора (см. подраздел 6.8). Так, если принять, что $P_1 = P_{эм} = P$, то для явнополюсного и неявнополюсного двигателей можно соответственно записать

$$P_{эм} = P' + P'' = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta;$$

$$P_{эм} = (m_1 U_1 E_0 / X_c) \sin \theta.$$

Электромагнитный момент получают делением электромагнитной мощности на угловую скорость поля ω_1 .

Поскольку большая часть синхронных двигателей – машины явнополюсные, далее будем рассматривать именно этот конструктивный вариант двигателя. Тогда

$$M = M' + M'' = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 X_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2 \omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (6.20)$$

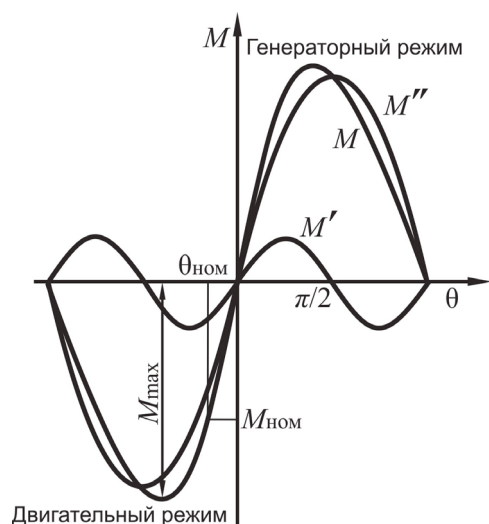


Рис. 6.35. Угловая характеристика электромагнитного момента явнополюсной синхронной машины

В двигателе электромагнитный вращающий момент направлен в сторону вращения ротора, а за счет составляющей момента M'' (реактивного момента) двигатель может работать и при отсутствии возбуждения (т. е. при $I_B = 0$ и $E_0 = 0$).

На рис. 6.35 показана угловая моментная характеристика $M = f(\theta)$ синхронной машины, работающей параллельно с сетью. Как и в синхронном генераторе, устойчивой является часть характеристики двигателя от начала координат до точки максимального момента $M_{\max}$, характеризующего перегрузочную способность. Угловая моментная

характеристика представляет собой механическую характеристику синхронного двигателя. При номинальном моменте на валу угол $\theta_{\text{ном}} = 20 \dots 30^\circ$.

Отношение $k_M = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ называется кратностью максимального момента и характеризует перегрузочную способность двигателя. Согласно стандарту кратность максимального момента должна быть не менее 1,65.

Как видно из уравнения (6.20), момент, развиваемый синхронным двигателем, пропорционален первой степени подводимого напряжения U_1 , т. е. синхронный двигатель менее чувствителен к изменению напряжения сети, чем асинхронный двигатель. Кроме того, максимальный момент можно увеличивать путем увеличения тока возбуждения (в формуле момента ему соответствует ЭДС E_0). Все это позволяет уменьшить расчетную перегрузочную способность k_M синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.

U-образные характеристики двигателя, которые так же, как и для генератора, можно построить по векторным диаграммам, при разных значениях активной мощности двигателя P представлены на рис. 6.36 ($U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$). При работе с опережающим током синхронный двигатель перевозбужден, а при работе с отстающим током – недовозбужден. При перевозбуждении двигатель генерирует реактивную мощность, что способствует повышению $\cos \varphi$ в узле нагрузки. Кроме того, уменьшение потребления реактивной мощности позволяет снизить реактивную мощность, вырабатываемую синхронными генераторами на электрических станциях, уменьшить ток и потери в линиях электропередачи. Возможность генерировать реактивную мощность выгодно отличает синхронные двигатели от асинхронных, которые потребляют реактивную мощ-

ность из сети для возбуждения. Поэтому синхронные двигатели проектируются для работы при номинальной мощности с перевозбуждением (опережающим током) и $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$. Работа с перевозбуждением предпочтительна также и для повышения максимального момента двигателя.

Уменьшение тока возбуждения приводит к уменьшению перегрузочной способности неявнополюсного двигателя, так как $P_{\text{max}} = m_1 U_1 E_0 / X_c$. Предел уменьшения тока возбуждения в зоне недовозбуждения показан на рис. 6.36 штриховой линией, для которой справедливо соотношение $P_{\text{max}} = P_i$, где $P_i = \text{const}$ – постоянная мощность на валу, при которой строится i -я U-образная характеристика. Если и дальше уменьшать ток возбуждения, то P_{max} станет меньше мощности приводимого механизма и двигатель выйдет из синхронизма. Иными словами, штриховой линией на этом рисунке показан предел статической устойчивости двигателя.

На рис. 6.36 приведены также зависимости $\cos\varphi = f(I_B)$ при различных значениях P (или M). Эти кривые показывают, что при изменении нагрузки синхронные двигатели могут работать с заданным значением $\cos\varphi$ за счет регулирования тока возбуждения.

Как видно из U-образной характеристики, соответствующей холостому ходу двигателя (кривая 1), ток в ее минимальной точке (в отличие от тока холостого хода генератора – см. рис. 6.31) равен не нулю, а активной составляющей тока холостого хода двигателя I_{10a} . Соответствующая этому току мощность P_{10} , потребляемая из сети, расходуется на покрытие потерь холостого хода двигателя.

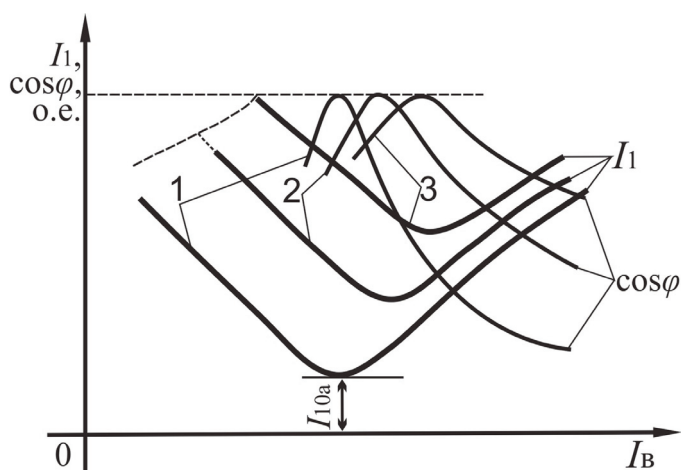


Рис. 6.36. U-образные характеристики синхронного двигателя и соответствующие им зависимости $\cos\varphi$ от тока возбуждения:

1 – $P = 0$; 2 – $P = 0,25$; 3 – $P = 0,5$

6.13. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочие характеристики представляют собой зависимости тока I_1 , электрической мощности P_1 , поступающей в обмотку якоря, КПД η и $\cos\varphi$ от отдаваемой механической мощности P_2 при $U_c = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$ (рис. 6.37). Часто эти характеристики строят в относительных единицах. Поскольку частота вращения двигателя постоянна, зависимость $n = f(P_2)$ обычно не приводится; не приводится также и зависимость

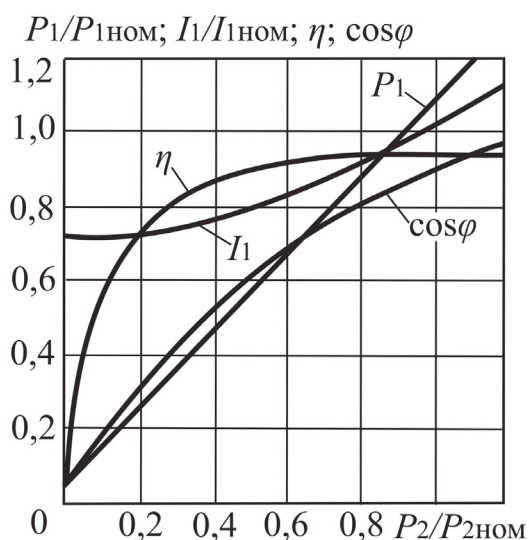


Рис. 6.37. Рабочие характеристики синхронного двигателя

$M = f(P_2)$, так как вращающий момент M пропорционален P_2 . Зависимость $P_1 = f(P_2)$ имеет характер, близкий к линейному.

Ток двигателя при холостом ходе является практически реактивным. По мере роста нагрузки возрастает активная составляющая тока, в связи с чем зависимость тока I_1 от мощности P_2 является нелинейной. Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет характер, общий для всех электрических машин. Синхронные двигатели могут работать при $\cos\varphi = 1$, но обычно их рассчитывают на работу при номинальной нагрузке с опережающим током и

$\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9 \dots 0,8$. В этом случае улучшается суммарный $\cos\varphi$ сети, от которой питаются синхронные двигатели, так как создаваемая ими опережающая реактивная составляющая тока I_1 компенсирует отстающую реактивную составляющую тока асинхронных двигателей. Зависимость $\cos\varphi = f(P_1)$ при работе машин с перевозбуждением имеет максимум в области $P_2 > P_{\text{ном}}$. При снижении P_2 значение $\cos\varphi$ уменьшается, а отдаваемая в сеть реактивная мощность возрастает.

6.14. Пуск в ход синхронного двигателя

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если обмотка статора подключена к сети переменного тока, когда ротор, по обмотке которого проходит постоянный ток, неподвижен, появившееся вращающееся поле статора не сможет сразу увлечь за собой ротор, обладающий значительной инерцией. В результате устойчивая магнитная связь между статором и ротором не возникнет. Следовательно, для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной, при которой между статором и ротором устанавливается устойчивая магнитная связь.

Асинхронный пуск. Этот способ пуска возможен при наличии короткозамкнутой пусковой обмоткой, выполненной аналогично демпферной обмотке синхронного генератора (рис. 6.38, а).

При включении трехфазной обмотки статора в сеть вращающееся магнитное поле наводит в стержнях 2 пусковой обмотки ЭДС, которые создают токи I_2 . Взаимодействие этих токов с полем статора вызывает появление на стержнях пусковой обмотки электромагнитных сил $F_{\text{эм}}$. Под

действием этих сил ротор 3 начинается ускоряться и достигает частоты вращения n , близкой к частоте вращения магнитного поля n_1 .

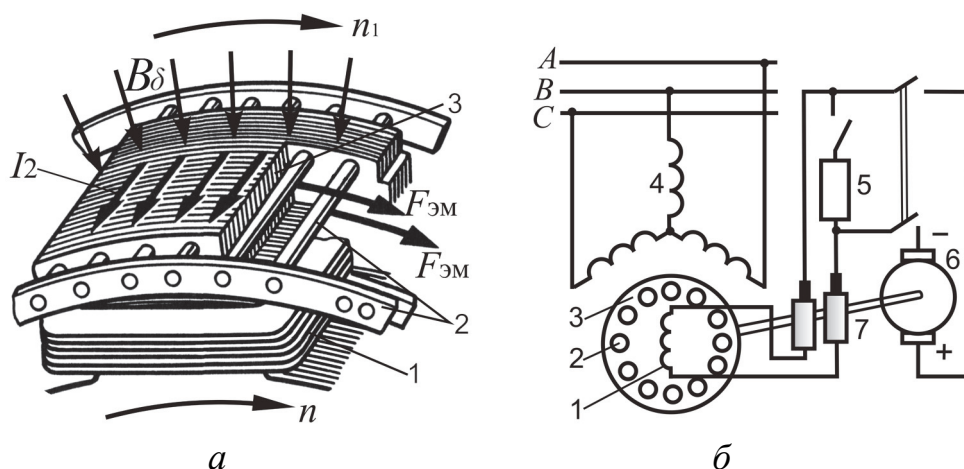


Рис. 6.38. Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя (а) и схема асинхронного пуска (б):

1 – обмотка возбуждения; 2 – пусковая обмотка; 3 – ротор; 4 – обмотка якоря;
5 – гасящее сопротивление; 6 – возбудитель; 7 – кольца и щетки

Механическая характеристика синхронного двигателя при асинхронном пуске аналогична механической характеристике асинхронного двигателя.

Ненагруженный двигатель может втянуться в синхронизм под действием реактивного момента. Если же реактивного момента оказывается недостаточно, то втягивание в синхронизм происходит после подачи постоянного тока в обмотку возбуждения 1 за счет возникающего при этом синхронизирующего момента. С этого времени машина начинает работать как синхронный двигатель.

На рис. 6.38, б показана схема включения синхронного двигателя при асинхронном пуске. В этом случае обмотка возбуждения 1 машины не должна быть разомкнутой, иначе из-за большого числа витков в ней вращающимся полем якоря при пуске (скольжении $s = 1$) индуцировалась бы значительная ЭДС, которая могла бы привести к пробое изоляции этой обмотки. Однако обмотку возбуждения не следует замыкать накоротко, так как в этом случае в ней могут протекать значительные токи, приводящие к провалу пускового. Следовательно, в начале пуска обмотка возбуждения должна быть замкнута на гасящее сопротивление 5, которое примерно в пять раз превышает активное сопротивление самой обмотки. Это существенно уменьшает ток, протекающий по обмотке, момент, действующий на ротор и провал момента на механической характеристике. По окончании пуска обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока (возбудителю 6), вследствие чего ротор втягивается в синхронизм.

Частотный пуск применяют при наличии автономного источника питания, частоту напряжения которого можно изменять от нуля до номинальной. Если плавно повышать частоту питающего напряжения, то соответственно будет увеличиваться частота вращения магнитного поля. При этом ротор, следуя за магнитным полем, постепенно будет повышать свою частоту вращения от нуля до номинальной.

При этом способе двигатель во время пуска возбужден (т. е. обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного тока), что позволяет осуществлять пуск при максимальном электромагнитном моменте и, следовательно, нагруженном приводимом механизме.

Пуск с помощью разгонного двигателя состоит в том, что посторонним (разгонным) двигателем ротор синхронной машины раскручивают до номинальной частоты вращения. Затем производят включение синхронной машины на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации или самосинхронизации. После синхронизации разгонный двигатель отсоединяют от вала синхронной машины, которая переходит в двигательный режим работы. Мощность разгонного двигателя составляет 10...20 % номинальной мощности синхронного двигателя, что обеспечивает быстрый разгон последнего до синхронной скорости.

При этом способе пуск синхронного двигателя осуществляется без нагрузки (т. е. приводимый механизм должен быть разгружен).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на бурное развитие техники, электрическая машина до сих пор остаётся наиболее важным и основным элементом энергетических установок. Сегодня электрические машины широко применяются практически во всех сферах деятельности человека. Они вырабатывают электрическую энергию (являются генераторами), высокоэффективно преобразуют её в механическую (электродвигатели), выполняют разнообразные функции по преобразованию и усилению различных сигналов в системах автоматического регулирования и управления. Современный самолет, поезд и другие транспортные средства насыщены различного рода электротехническими установками, в которые входят исполнительные и силовые электродвигатели. Силовой электропривод широко применяется в машиностроении, металлургии, сельском хозяйстве, строительстве и т. д. Микромашины используются в медицинской и другой специальной технике. Так, например, работа современного компьютера невозможна без исполнительных микродвигателей. Работа бытовой техники невозможна без однофазных электродвигателей переменного тока – это холодильники, вентиляторы, пылесосы, кухонные машины, электроинструменты и многое другое. Любой автолюбитель знает, что запуск автомашины невозможен без пус-

кового электродвигателя, а дальнейшая ее работа – без надежной работы электрогенератора. Приведенные примеры далеко не охватывают все современные области применения электрических машин. Их основные преимущества – возможность использования в широком диапазоне мощностей (от долей ватта до сотен мегаватт), высокий КПД, достигающий в мощных машинах 95...99 %, сравнительно малая масса и габариты, высокая надежность и долговечность, небольшая стоимость при серийном производстве. При работе электрических машин не выделяются вредные вещества, и они являются экологически безопасным видом технических устройств.

Изучению электрических машин отводится значительное место в процессе обучения любой электротехнической специальности. Исследования в этой области проводились на протяжении более длительного периода времени, чем в большинстве других отраслей электротехники. Однако и теперь существует широкое поле деятельности для дальнейшего практического и теоретического развития предмета. Теория электрических машин не стоит на месте. В настоящее время назрела необходимость согласовать разобщённые методы анализа с тем, чтобы найти более действенное средство для решения новых проблем.

Развивая электротехнику принципиально нового типа и нового качества, мы с признательностью вспоминаем тех, кто в далёком прошлом вёл тяжёлую борьбу за новое в технике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Беспалов, В. Я.** Электрические машины : учеб. пособие для студентов / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – 3-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
2. **Брускин, Д. Э.** Электрические машины и микромашины : учеб. для электротехн. спец. вузов / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 528 с.
3. **Вольдек, А. И.** Электрические машины : учеб. для студентов высш. техн. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
4. **Костенко, М. П.** Электрические машины. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1972. – 544 с.
5. **Костенко, М. П.** Электрические машины. Ч. 2. Машины переменного тока : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1973. – 648 с.

6. **Кацман, М. М.** Электрические машины : учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений / М. М. Кацман. – 3-е изд., испр. – М. : Высш. шк. : Издательский центр «Академия», 2001. – 463 с.

7. **Радин, В. И.** Электрические машины: Асинхронные машины : учеб. для электромех. спец. вузов / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. – М. : Высш. шк., 1988. – 328 с.

8. **Токарев, Б. Ф.** Электрические машины : учеб. для техникумов / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 672 с.