

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

В. А. Соломин, Н. А. Трубицина, Л. Л. Замшина

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

Часть 2

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Утверждено
учебно-методическим советом
университета

Ростов-на-Дону
РГУПС
2021

УДК 621.313(07) + 06

Рецензенты: доктор технических наук, профессор
Б. Н. Лобов (ЮРГТУ (НПИ));
кандидат технических наук, доцент
В. А. Осипов (РГУПС)

Соломин, В. А.

Электрические машины : учебное пособие : в 3 ч. / В. А. Соломин, Н. А. Трубицина, Л. Л. Замшина ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021.

ISBN 978-5-88814-909-6

Ч. 2 : Машины постоянного тока / В. А. Соломин, Н. А. Трубицина, Л. Л. Замшина. – 88 с.

ISBN 978-5-88814-911-9

Содержатся теоретические сведения о машинах постоянного тока, их конструкции, принципе действия, основных параметрах и характеристиках. Рассматриваются основные понятия и определения, режимы работы машин постоянного тока, схемы подключения их обмоток. Изучаются физические процессы и явления в двигателях и генераторах.

Для студентов очной и заочной форм обучения по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» всех специализаций, специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» всех специализаций, по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электромеханика», 15.03.03 «Прикладная механика» профилей «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг» и «Проектно-конструкторское обеспечение машиностроительных производств», при изучении дисциплин «Электрические машины», «Электрические машины и аппараты», «Тяговые электрические машины», «Электрический привод», а также для обучающихся магистратуры и аспирантуры.

Одобрено к изданию кафедрой «Электрические машины и аппараты».

ISBN 978-5-88814-911-9 (ч. 2)
ISBN 978-5-88814-909-6

© Соломин В. А., Трубицина Н. А.,
Замшина Л. Л., 2021
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| 1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОСНОВЫ ИХ ТЕОРИИ | 4 |
| 1.1 Роль и значение машин постоянного тока | 4 |
| 1.2 Принцип действия и конструкция машин постоянного тока | 5 |
| 1.3 Обмотки якоря машин постоянного тока | 14 |
| 1.4 Выбор типа обмотки. Уравнительные соединения | 24 |
| 1.5 Магнитная цепь машины постоянного тока | 26 |
| 1.6 Основные электромагнитные соотношения машин постоянного тока | 29 |
| 1.7 Щетки новой конструкции | 30 |
| 2 РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И КОММУТАЦИЯ МПТ | 32 |
| 2.1 Реакция якоря МПТ и ее виды | 32 |
| 2.2 Напряжение между коллекторными пластинами | 35 |
| 2.3 Компенсационная обмотка | 36 |
| 2.4 Коммутация машин постоянного тока | 37 |
| 2.5 Способы улучшения коммутации | 47 |
| 3 ГЕНЕРАТОРЫ И ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 50 |
| 3.1 Генераторы постоянного тока | 50 |
| 3.2 Уравнения генераторов постоянного тока | 52 |
| 3.3 Характеристики генераторов постоянного тока | 55 |
| 3.4 Двигатели постоянного тока | 67 |
| 3.5 Уравнения двигателей постоянного тока | 69 |
| 3.6 Характеристики двигателей постоянного тока | 73 |
| 3.7 Пуск в ход двигателей постоянного тока | 76 |
| 3.8 Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока | 79 |
| Библиографический список | 87 |

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОСНОВЫ ИХ ТЕОРИИ

1.1 Роль и значение машин постоянного тока

В настоящее время преимущественное распространение имеют сети переменного тока, поэтому в промышленности находят применение, главным образом, машины переменного тока. Вместе с тем широко используются и машины постоянного тока (МПТ). Это объясняется тем, что они обладают лучшими эксплуатационными характеристиками в отношении регулирования частоты вращения, пуска, реверса и допускают более высокие перегрузки по сравнению с машинами переменного тока. Помимо преимуществ МПТ имеют свои недостатки, основными из которых являются: высокая цена их изготовления и относительно низкая надежность эксплуатации из-за наличия механического коммутатора – коллектора, необходимость регулярного обслуживания коллекторно-щеточного узла, вызванная его износом. Однако современные МПТ этих недостатков практически не имеют.

В современном мире при стремительном развитии научно-технического прогресса (НТП) невозможно представить нашу жизнь без электродвигателей постоянного тока. Они приводят в действие станки, бытовую технику и инструменты, поезда, трамваи и троллейбусы, компьютеры, игрушки и разные подвижные механизмы, устанавливаются на производственных станках, если частоту вращения рабочего вала требуется регулировать в широком диапазоне.

Генераторы постоянного тока (ГПТ) также нашли свое применение в преобразовательных установках типа «двигатель-генератор» для получения постоянного тока из переменного с целью питания двигателей постоянного тока (ДПТ) и для других нужд в заводских и лабораторных условиях. Они также применяются на тепловозах магистральных железных дорог, на судах, для электросварки на постоянном токе, для освещения поездов, в качестве возбуждателей синхронных машин и т. д. Малогабаритные низковольтные генераторы (6–12 и 28 Вольт) широко применяются для освещения и зарядки аккумуляторов на самолетах и автомобилях всех типов.

В ряде случаев для специальных нужд применяются машины постоянного тока с постоянными магнитами весьма малой мощности в качестве тахогенераторов (для измерения частоты вращения машин), в качестве индукторов для испытания изоляции, в запальных машинах во взрывном деле и т. п.

Широкое применение МПТ требует большого разнообразия их номинальных данных (мощности, частоты вращения, напряжения) и различных конструктивных исполнений соответственно условиям их установки и эксплуатации. В настоящее время МПТ изготавливаются на мощности от долей ватт до 12 МВт. Номинальное напряжение их не превышает 1500 В и только иногда для крупных машин доходит до 3000 В. Частота вращения МПТ колеблется в широких пределах: от нескольких оборотов до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

1.2 Принцип действия и конструкция машин постоянного тока

На рис. 1.1 представлена схема простейшей машины постоянного тока.

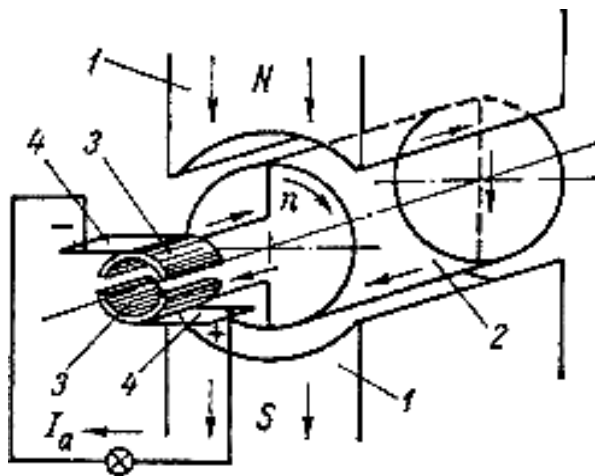


Рис. 1.1. Простейшая машина постоянного тока

Неподвижная часть машины, называемая *индуктором*, состоит из *главных полюсов* и круглого стального *ярма*, к которому прикрепляются полюсы. Назначением индуктора является создание в машине основного магнитного потока. Индуктор, изображенный на рис. 1.1, простейшей машины, имеет два *главных полюса* 1 в виде постоянных магнитов.

Вращающаяся часть МПТ состоит из укрепленных на валу цилиндрического якоря 2 и коллектора 3. Якорь состоит из *сердечника*, набранного из листов электротехнической стали, и *обмотки*, расположенной в пазах сердечника якоря. Назначение якоря – электромеханическое преобразование энергии: механической в электрическую и наоборот. Обмотка якоря в показанной на рис. 1.1 простейшей машине имеет один виток. Концы витка соединены с изолированными от вала медными пластинами простейшего коллектора, число которых в рассматриваемом случае равно двум. К коллектору прилегают две неподвижные электропроводящие щетки 4, с помощью которых обмотка якоря соединяется с внешней цепью.

Основной магнитный поток в МПТ создается обмоткой возбуждения, которая расположена на сердечниках полюсов и питается постоянным током. Магнитный поток проходит от северного полюса N через якорь к южному полюсу S и от него через ярмо снова к северному полюсу. Сердечники полюсов и ярмо также изготавливаются из ферромагнитных материалов.

На рис. 1.2, а изображен главный полюс машины. Сердечники полюсов набираются из листов из конструкционной стали толщиной 0,5–2 мм или могут быть литыми. Так как магнитный поток полюсов в стационарных режимах не изменяется, то листы друг от друга обычно не изолируются.

Сердечник полюса стягивается шпильками, концы которых расклепываются. Нижняя, уширенная часть сердечника называется *полюсным наконечником* или *бабшмаком*. Расположенная на полюсе обмотка (обмотка возбуждения) часто разбивается на 2–4 катушки для лучшего ее охлаждения.

Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюсы чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек возбуждения отдельных полюсов (последовательное соединение). Мощность, затрачиваемая на возбуждение, составляет около 0,5–3 % от номинальной мощности машины.

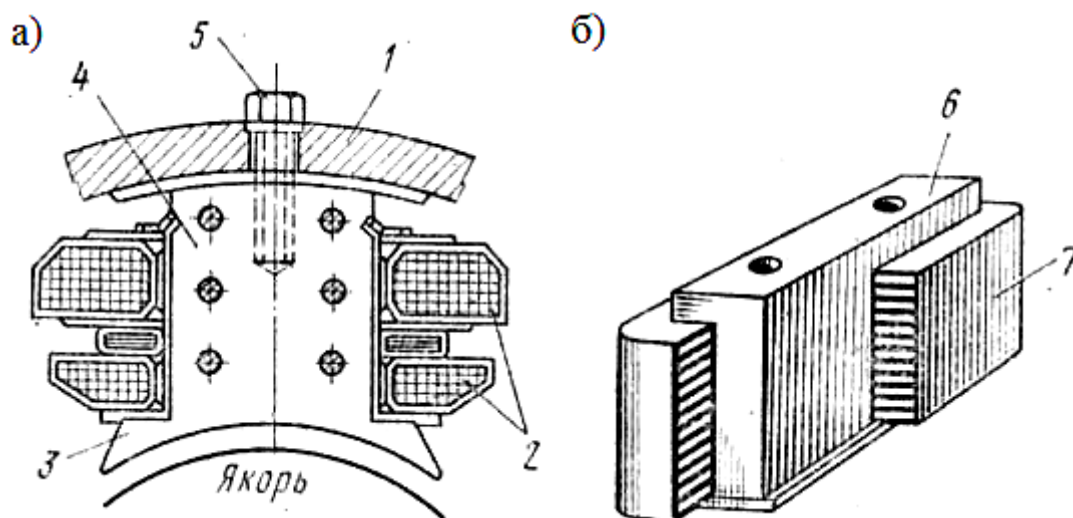


Рис. 1.2. Главный *а* и добавочный *б* полюсы МПТ:
1 – станина; 2, 7 – полюсные катушки; 3 – полюсный наконечник;
4, 6 – сердечники полюсов; 5 – болт

Для улучшения условий токобъема с коллектора в машинах мощностью более 0,5 кВт между главными полюсами устанавливаются также *дополнительные (добавочные) полюсы*, которые меньше главных по своим размерам. Сердечники дополнительных полюсов обычно изготавливаются из конструкционной стали и могут быть как шихтованными, так и литыми (рис. 1.2, *б*).

Как главные, так и дополнительные полюсы крепятся к ярму с помощью болтов. Ярмо в современных машинах обычно выполняется из стали (из стальных труб в машинах малой мощности, из стального листового проката, а также из стального литья).

В МПТ массивное ярмо является одновременно и станиной, т. е. той частью, к которой крепятся другие неподвижные части машины, и с помощью которой машина обычно крепится к фундаменту или другому основанию.

В обмотке якоря происходит процесс преобразования энергии одного вида в другой.

Сердечник якоря набирается из штампованных дисков (рис. 1.3) электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы сердечника обычно изолированы с двух сторон тонкой пленкой лака, но могут быть и оксидированы. Диски насаживаются либо непосредственно на вал (при $D_a \leq 750$ мм), либо набираются на якорную втулку ($D_a \geq 750$ мм), которая надевается на вал. Сердечники якоря диаметром 1000 мм и выше составляются из штампованных сегментов электротехнической стали. Сегменты набираются на ступицу якоря, которая изготавливается обычно из листового стального проката и с помощью втулки соединяется с валом (рис. 1.4). Для крепления

к ступице якоря сегменты штампуются с гнездами для «ласточкиных хвостов» либо с выступающими «ласточкиными хвостами».

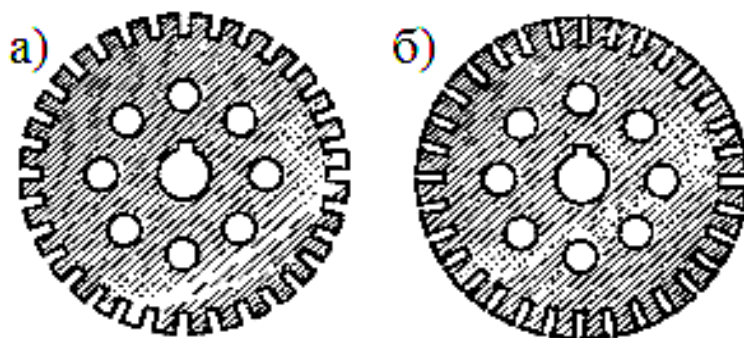


Рис. 1.3. Пластина якоря МПТ с открытыми пазами *а* и полузакрытыми *б*

В сердечнике якоря для лучшего охлаждения машины и в зависимости от выбранной системы вентиляции могут быть *аксиальные* или *радиальные каналы* для охлаждения. Аксиальные каналы образуются выштампованными в дисках сердечника отверстиями (рис. 1.3). Радиальные каналы создаются с помощью дистанционных распорок или ветрениц, посредством которых сердечник якоря подразделяется на отдельные пакеты *1* шириной 40–70 мм и каналы *2* между ними шириной около 5–10 мм (рис. 1.6). Ветреницы приклепываются или привариваются к крайним листам пакетов. Сердечник якоря крепится с помощью нажимных плит или фланцев *б*.

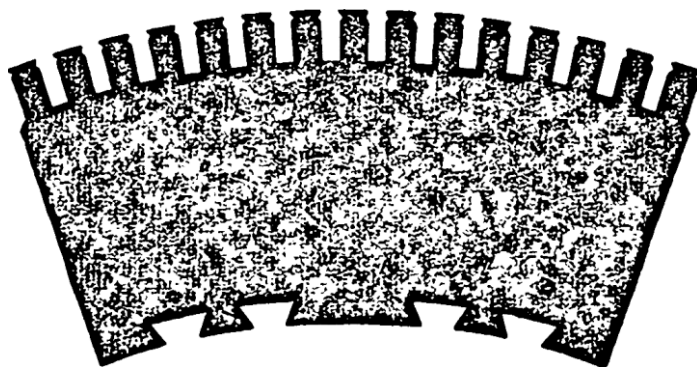


Рис. 1.4. Сегмент сердечника якоря МПТ

В пазы на внешней поверхности якоря укладываются секции обмотки. Обмотка якоря выполняется из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения в зависимости от мощности машины. Она состоит из отдельных элементов – *секций* (рис. 1.5), образованных из одного или нескольких витков. Секции изготавливаются по шаблонам. Концы секций припаиваются или привариваются к коллекторным пластинам. Для крепления секций в пазах применяются деревянные, гетинаксовые или текстолитовые клинья. Кроме витковой изоляции обмотка имеет пазовую изоляцию от сердечника. Выступающие с каждой стороны из сердечника якоря (рис. 1.6) лобовые части обмотки *3* имеют вид цилиндрического кольца и своими внутренними поверхностями опираются на об-

моткодержатели 5, а по внешней поверхности крепятся проволочными бандажами 7. Обмотка соединяется с коллектором 4 и характеризуется шагами.

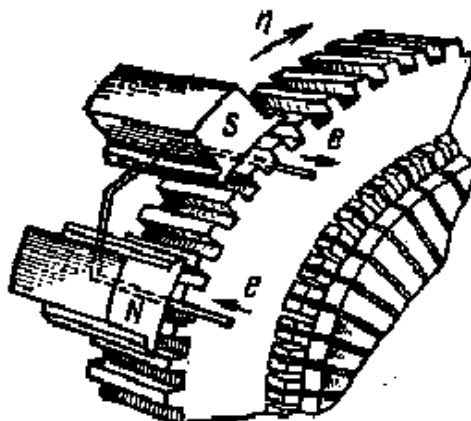


Рис. 1.5. Расположение проводников обмотки на якоре

Величина воздушного зазора между полюсами и якорем в малых машинах менее 1 мм, а в крупных – до 10 мм.

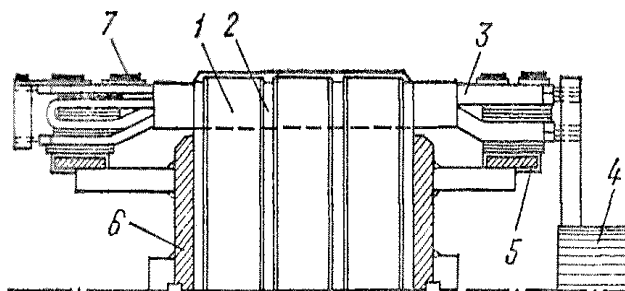


Рис. 1.6. Сердечник якоря МПТ с обмоткой:

1 – пакеты; 2 – каналы; 3 – лобовые части обмотки; 4 – коллектор;
5 – обмоткодержатели; 6 – фланцы; 7 – бандажи

Электроизоляционные материалы, применяемые для изоляции обмоток, по степени термостойкости делятся на классы, которые допускают определенную температуру нагрева. В машинах постоянного тока применяются, в основном, классы изоляции А, В, F, С и H.

Устройство коллектора машины показано на рис. 1.7. Он состоит из медных пластин 1 толщиной 3–15 мм, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками толщиной около 1 мм. Пластины имеют трапецеидальное сечение и вместе с прокладками составляют кольцо, которое скрепляется с помощью нажимных фланцев 4, стянутых стяжными болтами 7. От нажимных фланцев пластины коллектора изолируются миканитовыми коллекторными манжетами 2. Собранный коллектор крепится на валу 6 с помощью шпонки 5. К каждой пластине коллектора присоединяются соединительные проводники – «петушки» 3 – от обмотки якоря. Собранный коллектор представлен на рис. 1.8.

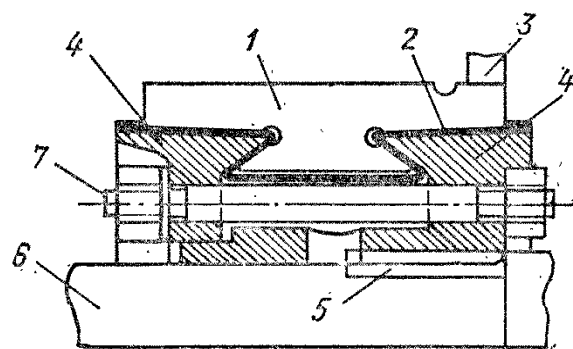


Рис. 1.7. Устройство коллектора МПТ:
 1 – медные пластины; 2 – миканитовые манжеты; 3 – «петушки»;
 4 – нажимные фланцы; 5 – шпонка; 6 – вал; 7 – стяжные болты

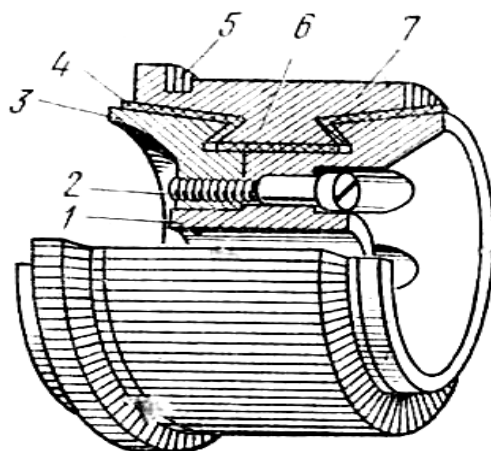


Рис. 1.8. Общий вид коллектора МПТ:
 1 – корпус; 2 – стяжной болт; 3 – нажимное кольцо; 4 – миканитовая прокладка;
 5 – «петушок»; 6 – «ласточкин хвост»; 7 – пластины коллектора

Поверхность медных пластин коллектора в процессе работы машины постепенно истирается щетками. Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью медных пластин, что могло бы привести к нарушению электрического контакта коллектора со щетками, приходится периодически выполнять «продоразивание» коллектора. Эта операция состоит в том, что между рабочими поверхностями коллекторных пластин фрезеруют пазы (дорожки) на глубину до 1,5 мм (рис. 1.9).

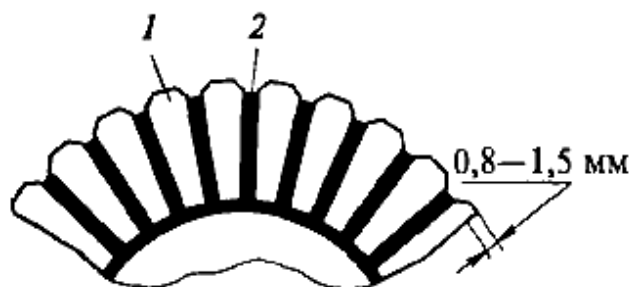


Рис. 1.9. «Продоразивание» коллектора:
 1 – медные пластины; 2 – миканитовые прокладки

Для отвода тока от вращающегося коллектора и подвода к нему тока применяется *щеточный аппарат*, который состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев, щеточной траверсы и токособирающих шин (рис. 1.10).

Непосредственный контакт с коллектором имеет щетка. Она выполняется обычно из обработанной смеси угля, графита и других компонентов в виде прямоугольной призмы и помещается в обойму щеткодержателя. Щетка может перемещаться в обойме в радиальном по отношению к коллектору направлении и для плотного прилегания прижимается к нему пружиной через нажимной рычаг. Щеткодержатели укрепляются на щеточных пальцах. На каждом щеточном пальце обычно помещают несколько щеткодержателей со щетками, которые работают параллельно. Щетки для равномерного износа коллектора располагаются на его поверхности в шахматном порядке и соединяются с пальцами медными гибкими тросиками. Щеточные пальцы, число которых обычно равно числу главных полюсов, крепятся в щеточной траверсе и электрически изолируются от нее. Траверса крепится к неподвижной части машины: в машинах малой и средней мощности – к втулке подшипникового щита, а в крупных машинах – к станине или фундаментной плите. Может быть предусмотрена возможность поворота траверсы для установки щеток в правильное положение (на линии геометрической нейтрали). Полярности щеточных пальцев чередуются. Пальцы, имеющие одинаковую полярность, соединяются посредством соединительной шины, от которой делается отвод в клеммную коробку машины или к обмотке дополнительного полюса. В клеммной коробке устанавливается изоляционная панель с клеммами, к которым подсоединяются выводы обмоток машины для соединения с внешней электрической сетью.

Коллектор и щеточный аппарат являются весьма ответственными узлами машины, от конструкции и качества изготовления которых в большой степени зависит бесперебойная работа машины и надежность электрического контакта между коллектором и щетками.

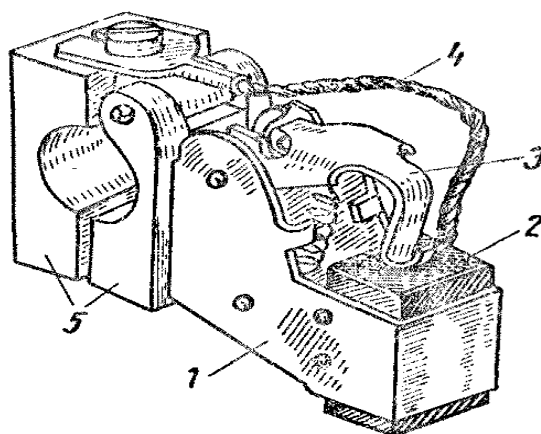


Рис. 1.10. Щеткодержатель со щеткой:

- 1 – обойма щеткодержателя; 2 – щетка; 3 – нажимная пружина;
4 – токоведущий кабель; 5 – колодки для крепления к пальцу

Рассмотрим работу машины в режиме генератора – ГПТ (рис. 1.11, а). Предположим, что якорь машины приводится во вращение по часовой стрелке. Тогда в проводниках обмотки якоря индуцируется электродвижущая сила (ЭДС), направление которой может быть определено по правилу правой руки. Поскольку магнитный поток полюсов является неизменным во времени, то эта ЭДС индуцируется только при вращении якоря и называется *ЭДС вращения*. Величина индуцируемой в проводнике обмотки якоря ЭДС вычисляется по формуле:

$$e_{np} = B\ell v, \text{ В}, \quad (1.1)$$

где B – величина магнитной индукции в воздушном зазоре между полюсом и якорем в месте расположения проводника, Тл;

ℓ – активная длина проводника, т. е. та длина, на протяжении которой он расположен в магнитном поле, м;

v – скорость вращения проводника, м/с.

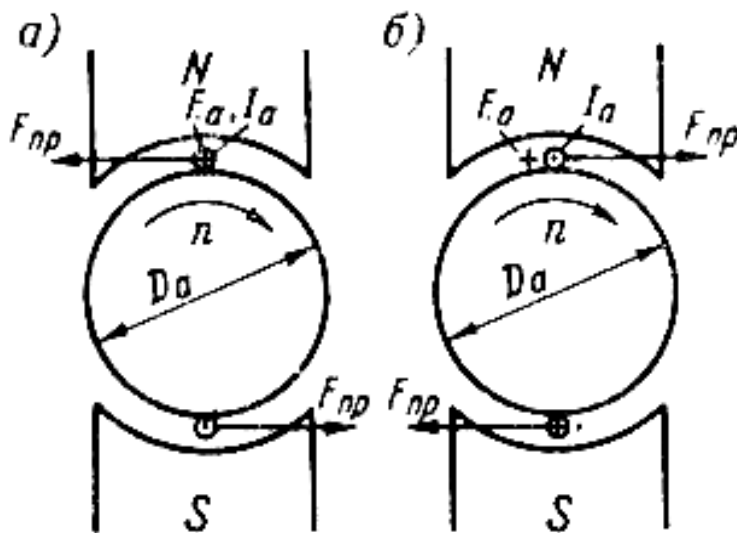


Рис. 1.11. Работа простейшей МПТ в режиме генератора а и двигателя б

В обоих проводниках вследствие симметрии индуцируются одинаковые ЭДС, которые по контуру витка складываются, и поэтому полная ЭДС якоря рассматриваемой машины равна:

$$E_a = 2 \cdot e_{np} = 2B\ell v, \text{ В}. \quad (1.2)$$

Эта ЭДС является переменной, т. к. проводники обмотки якоря проходят попеременно под северным и южным полюсами, в результате чего направления ЭДС в проводниках меняются. По форме кривая ЭДС проводника в зависимости от времени повторяет кривую распределения магнитной индукции вдоль воздушного зазора (рис. 1.12, а).

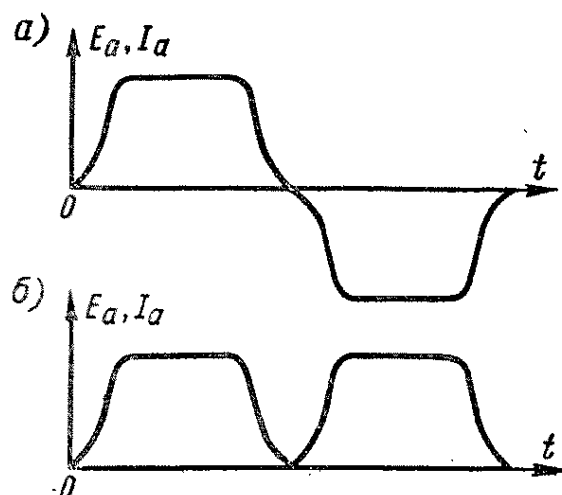


Рис. 1.12. Кривые ЭДС и тока простейшей МПТ в якоре *a* и во внешней цепи *б*

Частота ЭДС в двухполюсной машине равна скорости вращения якоря:

$$f = n, \text{ об/с.} \quad (1.3)$$

В общем случае, когда машина имеет p пар полюсов с чередующейся полярностью, то частота ЭДС вычисляется по формуле:

$$f = pn, \text{ об/с.} \quad (1.4)$$

Если обмотка якоря с помощью щеток замкнута через внешнюю цепь, то в этой цепи, а также в обмотке якоря возникает ток I_a . В обмотке якоря этот ток будет переменным (рис. 1.12, *a*). Однако во внешней цепи направление тока будет постоянным (рис. 1.12, *б*), что объясняется действием коллектора. Действительно, при повороте якоря и коллектора на 180° и изменении направления ЭДС в проводниках одновременно происходит также смена коллекторных пластин под щетками. Вследствие этого, под верхней щеткой всегда будет находиться пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным полюсом, а под нижней щеткой – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. В результате этого полярность щеток и направление тока во внешней цепи остаются неизменными.

Таким образом, в генераторе коллектор является *механическим выпрямителем*, который преобразует переменный ток обмотки якоря в постоянный ток во внешней цепи.

Напряжение постоянного тока на зажимах якоря генератора будет меньше E_a на величину падения напряжения в сопротивлении цепи якоря:

$$U_a = E_a - I_a r_a, \text{ В.} \quad (1.5)$$

Проводники обмотки якоря с током I_a находятся в магнитном поле, поэтому на них будут действовать электромагнитные силы, вычисляемые по формуле 1.6, направление которых определяется по правилу левой руки:

$$F_{np} = B\ell I_a, \text{ А.} \quad (1.6)$$

Эти силы создают механический вращающий момент $M_{эм}$, направленный встречно $M_{перв.двиг}$, который называется *электромагнитным моментом* и равен:

$$M_{эм} = F_{np} \cdot D_a = B\ell I_a \frac{D_a}{2}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1.7)$$

где D_a – диаметр якоря, м.

ГПТ преобразует механическую энергию в электрическую.

Рассматриваемая простейшая машина может работать также *двигателем – ДПТ и преобразовывать электрическую энергию в механическую*, если к обмотке ее якоря подвести постоянный ток от внешнего источника (рис. 1.12, б). При этом на проводники обмотки якоря будут действовать электромагнитные силы F_{np} и возникает электромагнитный момент $M_{эм}$. Величины F_{np} и $M_{эм}$, как и для генератора, определяются равенствами 1.6 и 1.7. При достаточной величине $M_{эм}$ якорь машины придет во вращение. Момент $M_{эм}$ при этом является движущим и действует в направлении вращения.

Чтобы при той же полярности полюсов направления вращения генератора и двигателя были одинаковы, то направление действия $M_{эм}$, а следовательно, и тока I_a у двигателя должны быть обратными по сравнению с генератором.

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток в обмотке якоря и работает в качестве *механического инвертора* тока.

Проводники обмотки якоря двигателя также вращаются в магнитном поле, поэтому в обмотке якоря двигателя тоже индуцируется ЭДС E_a , величина которой определяется равенством 1.2. Направление этой ЭДС в двигателе такое же, как и в генераторе. Таким образом, в двигателе ЭДС якоря E_a направлена против тока I_a и приложенного к зажимам якоря напряжения U_a . Поэтому ЭДС якоря двигателя называется *противодвижущей силой*.

Приложенное к якорю двигателя напряжение уравнивается ЭДС E_a и падением напряжения в обмотке якоря:

$$U_a = E_a + I_a r_a, \text{ В.} \quad (1.8)$$

Таким образом, каждая МПТ может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Такое свойство присуще всем типам вращающихся ЭМ и называется *обратимостью*.

Для перехода МПТ из режима генератора в режим двигателя и обратно при неизменной полярности полюсов и щеток и при неизменном направлении вращения требуется только изменение направления тока в обмотке якоря. Поэтому такой переход может осуществляться весьма просто и в определенных условиях даже автоматически.

1.3 Обмотки якоря машин постоянного тока

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных в пазах на внешней поверхности сердечника якоря и присоединенных к коллектору. Такие обмотки называются барабанными.

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины и должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальной мощности;
- 2) обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, обеспечивающую достаточно продолжительный срок службы машины (до 15–20 лет);
- 3) конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токосъема с коллектора;
- 4) расход материала при заданных эксплуатационных показателях (КПД и др.) должен быть минимальным;
- 5) технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

Обычно обмотка якоря выполняется из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения в зависимости от мощности машины, а в машинах больших мощностей – из шин прямоугольного поперечного сечения. Она состоит из отдельных элементов – *секций*, образованных из одного или нескольких витков. Несколько секций, скрепленных между собой для удобства укладки в пазы якоря, образуют *катушку*. Секции изготавливаются по шаблонам. Части секций, лежащие в пазу, называются *активными сторонами секции*, они находятся в магнитном поле главных полюсов и при вращении якоря в них индуцируется ЭДС. Части секции, находящиеся вне пазов, называются *лобовыми частями*. Они находятся вне основного магнитного потока и соединяют между собой активные стороны. Начала и концы секций припаиваются или привариваются к коллекторным пластинам (рис. 1.13). Для крепления секций в пазах применяются деревянные, гетинаксовые или текстолитовые клинья. Кроме витковой изоляции обмотка имеет пазовую изоляцию от сердечника.

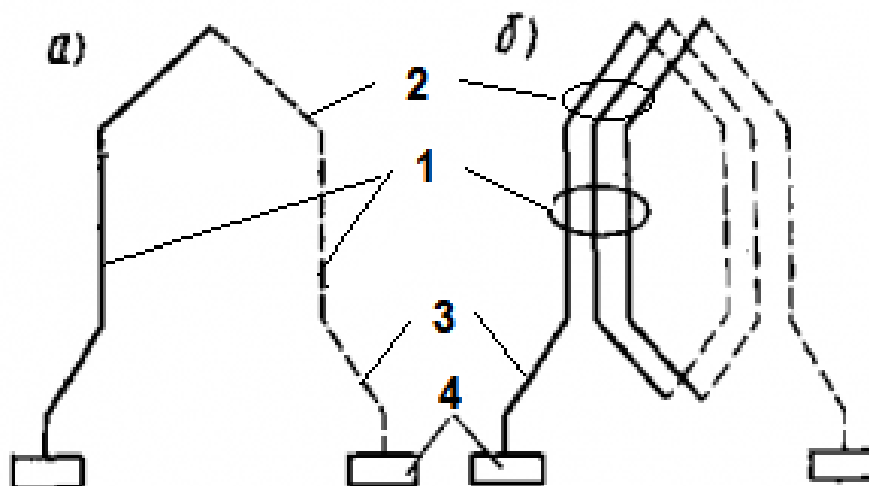


Рис. 1.13. Схемы одновитковой *а* и многовитковой *б* секций волновой обмотки:

1 – активные проводники; *2* – передняя лобовая часть;
3 – задняя лобовая часть; *4* – коллекторные пластины

Для удобного расположения выходящих из пазов лобовых частей обмотки якоря выполняются двухслойными. При этом в каждом пазу секции располагаются в два слоя (рис. 1.14): одна сторона каждой секции – в верхнем слое одного паза, а другая – в нижнем слое другого паза. Верхняя сторона одной секции и нижняя сторона другой, уложенные в одном пазу, образуют так называемый *элементарный паз*. В реальном пазу может располагаться несколько элементарных пазов, их число равно числу секций в катушке. На рис. 1.15 представлен разрез реального паза, состоящего из одного элементарного паза, и разрез реального паза, включающего два элементарных паза.

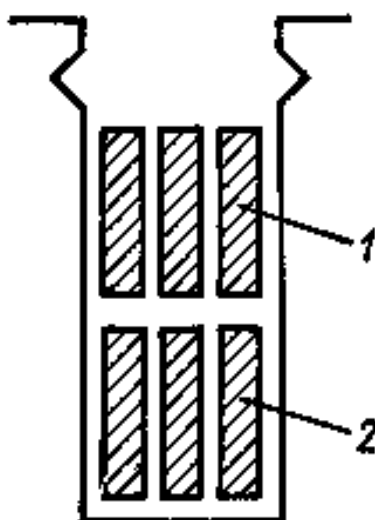


Рис. 1.14. Укладка обмотки в пазу:

1 – сторона секции верхнего слоя;
2 – сторона секции нижнего слоя



Рис. 1.15. Разрез реального паза, содержащего один элементарный паз a и разрез паза $б$, имеющего два элементарных паза $U_s = 2$

На схемах обмоток стороны секций, находящиеся в верхнем слое, будем изображать сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, – штриховыми линиями (рис. 1.16).

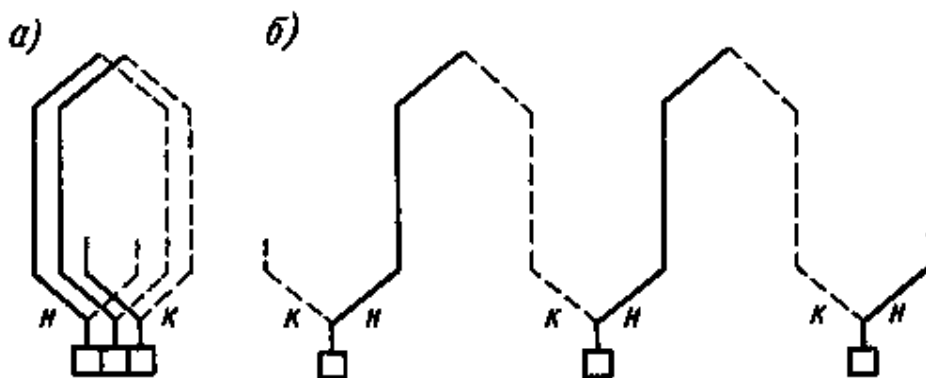


Рис. 1.16. Соединение секций петлевой a и волновой $б$ обмоток

Обмотки якоря подразделяют на *волновые* и *петлевые*, и в зависимости от схем соединений на *простые* и *сложные*. *Комбинированная (лягушечья)* обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой сочетание соединённых между собой секций петлевой и волновой обмоток, расположенных в одних пазах и присоединённых к общему коллектору. В комбинированных обмотках секции укладывают в пазах в четыре слоя, а к каждой пластине коллектора припаивают по четыре вывода обмоток. Достоинством комбинированных обмоток является большое число параллельных ветвей, но их применение ограничено технологическими трудностями – сложность изготовления и укладки секций, сложность пайки их выводов к «петушкам» коллектора.

Простая петлевая обмотка

Петлевая обмотка получается, если последовательно соединять между собой рядом лежащие секции. Свое название обмотка получила вследствие того, что при последовательном соединении секций обмотки образуют форму петель. На рис. 1.17 представлены два возможных варианта последовательного соединения секций простой петлевой обмотки – *неперекрещенной* и *перекрещенной*. Если укладка секций обмотки ведётся слева направо по якорю, то обмотку называют *правоходовой* или *неперекрещенной*, а если укладка секций ведётся справа налево, то обмотку называют *левоходовой* или *перекрещенной*. Эту обмотку называют также *параллельной*. На рис. 1.17 показаны шаги простой петлевой обмотки якоря МПТ:

y_1 – *первый частичный шаг* – расстояние по поверхности якоря между начальной и конечной сторонами секции;

y_2 – *второй частичный шаг* – расстояние между конечной стороной данной секции и начальной стороной последующей за ней по схеме обмотки секции;

y_k – *шаг по коллектору* – расстояние в коллекторных делениях между серединами коллекторных пластин, к которым присоединены концы данной секции;

y – *результатирующий шаг обмотки* – расстояние между начальными сторонами данной и последующей за ней секцией.

Шаги обмотки измеряют в элементарных пазах, а шаг по коллектору – в коллекторных делениях.

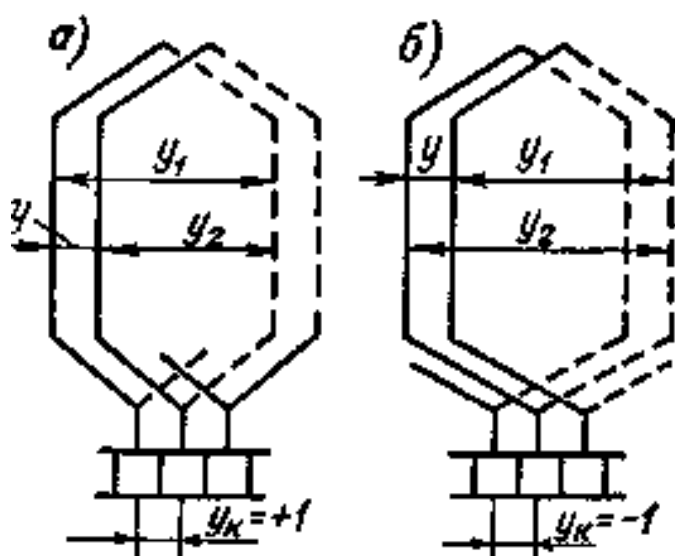


Рис. 1.17. Секции неперекрещенной *а* и перекрещенной *б* простой петлевой обмотки

Шаг y_1 выбирают таким образом, чтобы начало и конец секции располагались под полюсами разной полярности, т. е. чтобы ширина секции равнялась полюсному делению. Тогда при вращении якоря ЭДС, наводимые в сторонах секции, будут иметь противоположные направления, а в контуре секции они будут суммироваться.

Шаг y_1 определяется по формуле:

$$y_1 = \frac{Z_{\vartheta}}{2p} \pm \varepsilon, \quad (1.9)$$

где Z_{ϑ} – число элементарных пазов;

p – число пар полюсов МПТ;

ε – правильная дробь, при которой y_1 равен целому числу (значение ε может быть взято со знаком плюс и со знаком минус, чаще всего ε принимают со знаком минус, так как в этом случае уменьшается расход провода на обмотку).

Если $y_1 = \frac{z_{\vartheta}}{2 \cdot p} = \tau_{\Pi}$ целое число, то шаг обмотки называют полным или диаметральной (τ_{Π} – полюсное деление, выраженное в элементарных пазах).

При $y_1 < \frac{z_{\vartheta}}{2 \cdot p}$ обмотка будет иметь укороченный шаг. Для всех применяемых в машинах постоянного тока обмоток шаг y_1 определяется по формуле 1.9. Значения других шагов зависят от типа обмотки.

Результирующий шаг простой петлевой обмотки находят из выражения:

$$y = y_1 + y_2. \quad (1.10)$$

Шаг по коллектору в простой петлевой обмотке равен:

$$y = y_k = \pm 1. \quad (1.11)$$

Знак плюс соответствует случаю $|y_2| > y_1$ и такие обмотки называются *неперекрещенными*; знак минус соответствует случаю $|y_2| < y_1$ и такие обмотки называются *перекрещенными*. Во втором случае расход меди несколько больше, и поэтому выполнения таких петлевых обмоток избегают. В электромагнитном отношении эти обмотки равноценны и различаются только тем, что при той же полярности полюсов и том же направлении вращения полярности щеток противоположны.

Построим схему-развертку для петлевой обмотки при $Z_{\vartheta} = 18$ и $2p = 4$.

Шаги обмотки будут иметь следующие значения:

$$2p = 4; Z = Z_{\vartheta} = S = K = 18; y_1 = \frac{Z_{\vartheta}}{2p} - \varepsilon = \frac{18}{4} - \frac{1}{2} = 4;$$

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3; y = y_k = +1.$$

Будем присваивать секционным сторонам номера тех элементарных пазов, в которых они лежат. Тогда по известным значениям шагов можно определить соединения секционных сторон обмотки (рис. 1.17), исходя из определенного элементарного паза и прибавляя к номеру этого паза значение первого частичного шага, значение второго шага, затем опять первого и т. д. Номера верхних сторон секций, изображенных сплошными линиями, проставлены на рис. 1.18 сверху, а номера нижних сторон секций, изображенных штриховыми линиями, – снизу. Таким образом, обмотка является замкнутой.

По известным шагам можно начертить также схему обмотки (рис. 1.19). На данном рисунке проставлены номера элементарных пазов. Условимся присваивать коллекторной пластине номер той секции, с началом которой соединена эта пластина.

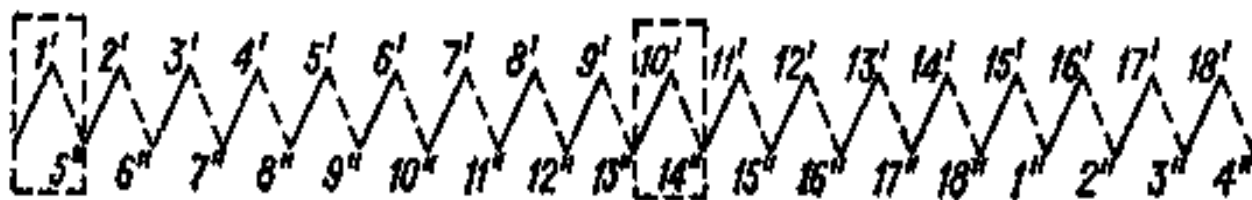


Рис. 1.18. Соединения секционных сторон простой петлевой обмотки

При вращении якоря некоторая часть секций, выделенных на рис. 1.19 жирными линиями, оказывается неизбежно замкнутой накоротко через щетки. Чтобы индуцируемые в этих секциях ЭДС были минимальны и в секциях не возникало чрезмерных токов, которые вызовут перегрузку щеточных контактов, такие короткозамкнутые секции должны находиться на линии геометрической нейтрали или в ближайшей от этой линии нейтральной зоне.

Для этого щетки устанавливаются так, чтобы в середине периода короткого замыкания стороны секции располагались симметрично относительно середины полюса. Тогда говорят, что щетки установлены на нейтрали. При симметричной форме лобовых частей секций щетки расположены по осям главных полюсов.

Совершим обход цепи обмотки (рис. 1.19) слева направо, начиная с секции 2. Проходя последовательно, начиная от щетки $B1$, секции 2, 3, 4 и 5, получим движение по направлению индуцируемых ЭДС и выходим к щетке $A1$. Следовательно, эти секции составляют одну параллельную ветвь, ЭДС которой равна сумме ЭДС этих секций. Проходя затем от щетки $A1$ к щетке $B2$ по контуру секций 6, 7, 8, 9, обходим вторую параллельную ветвь, двигаясь против направления индуцируемых ЭДС. Секция 10 замкнута накоротко. Секции 11, 12, 13 и 14, расположенные между щетками $B2$ и $A2$, составляют третью ветвь, а секции 15, 16, 17 и 18, расположенные между щетками $A2$ и $B1$, – четвертую ветвь. Обход этой последней ветви также совершается против направления ЭДС, причем после нее происходит приход к пластине 1. Секция 1 также замкнута накоротко. Через каждую щетку простой петлевой обмотки протекают токи двух параллельных ветвей.

Верхние стороны секций каждой параллельной ветви находятся под одним полюсом, а нижние – под другим. На рис. 1.18 короткозамкнутые секции обозначены штриховыми прямоугольниками, а на рис. 1.19 – жирными линиями.

Таким образом, обмотка на рис. 1.19 имеет четыре параллельные ветви, а в общем случае простая петлевая обмотка содержит число параллельных ветвей:

$$2a = 2p, \quad (1.12)$$

что является характерной особенностью этой обмотки.

Если машина работает в режиме генератора, стрелки на рис. 1.19 указывают также направление токов в обмотке. При этом полный ток якоря I_a тоже распределяется по четырем ветвям. В соответствии с изложенным цепь обмотки можно изобразить упрощенно, как показано на рис. 1.20, где ветви обмотки и распределение тока выглядят более наглядно.

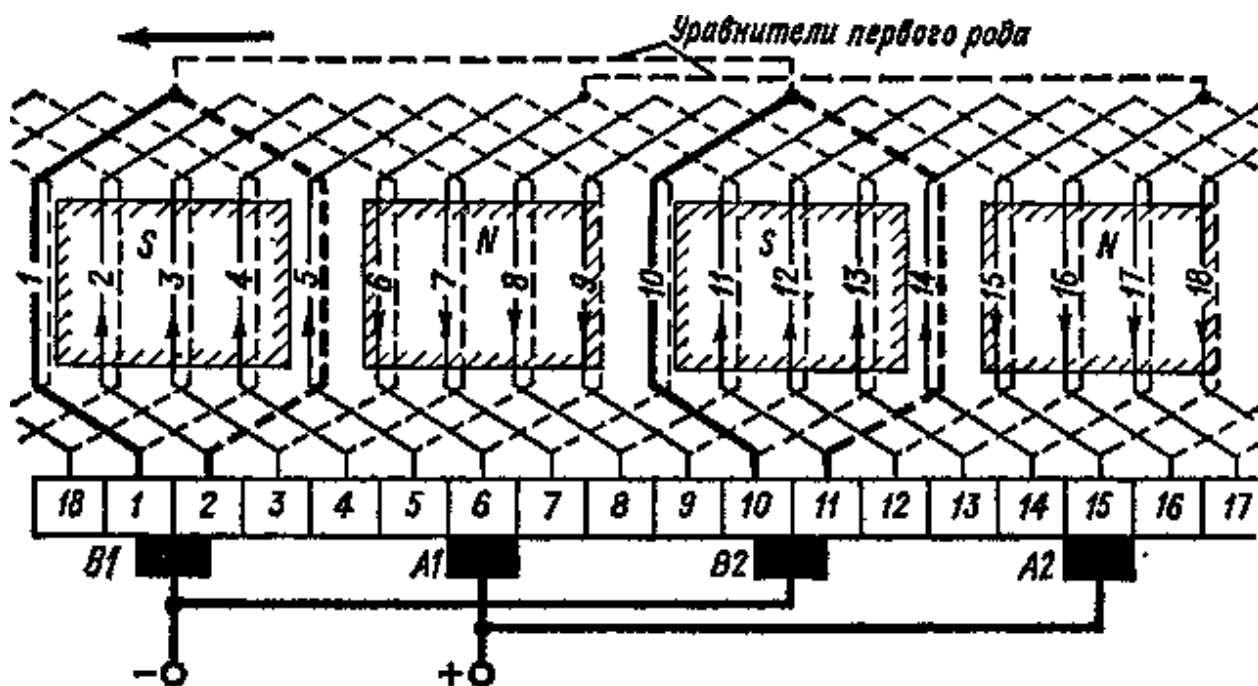


Рис. 1.19. Схема-развертка простой петлевой обмотки с $2p = 4$, $Z = Z_s = S = K = 18$, $y = 4$, $y_2 = -3$, $y = y_k = +1$

На основании рассмотрения рис. 1.19 можно установить также следующее. Если обмотка имеет полный шаг и щетки установлены на нейтрالي, то ЭДС ветви будет наибольшей. Кроме того, при этом направлении токов всех проводников, лежащих под одним полюсом, будут одинаковы, и поэтому развиваемый электромагнитный момент будет максимальным. Следовательно, такое устройство обмотки и такое расположение щеток являются наиболее выгодными. Небольшое отклонение шага y_1 от полного не оказывает заметного влияния на величину ЭДС и вращающего момента, так как изменение направления ЭДС и токов при этом происходит только в таких проводниках параллельной ветви, которые располагаются вблизи нейтрали, т. е. в зоне слабого магнитного поля.

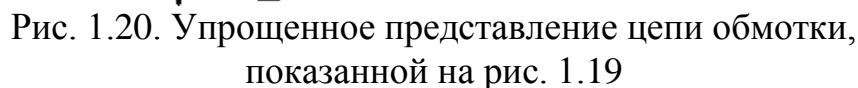
Простые петлевые обмотки якорей машин постоянного тока применяют в маломощных двухполюсных машинах постоянного тока, а также в мощных (300–590 кВт) многополюсных машинах при низком напряжении, т. е. они применяются для машин работающих с большим током нагрузки.

Сложная петлевая обмотка

Сложную, или многоходовую, петлевую обмотку можно рассматривать как сочетание нескольких ($m = 2, 3 \dots$) простых петлевых обмоток. Такую обмотку называют также *сложной параллельной*. В рассматриваемой обмотке секции и коллекторные пластины m простых обмоток по окружности чередуются и для отвода тока из обмотки необходимо, чтобы ширина щеток была не меньше m коллекторных делений.

Таким образом, m простых обмоток m -ходовой обмотки включаются с помощью щеток параллельно и количество параллельных ветвей сложной петлевой обмотки:

$$2a = 2pm. \quad (1.13)$$


$$y = y_{\kappa} = \pm m. \quad (1.14)$$

Простая волновая обмотка

$$y_\kappa = y = \frac{K \mp 1}{p}. \quad (1.15)$$

21

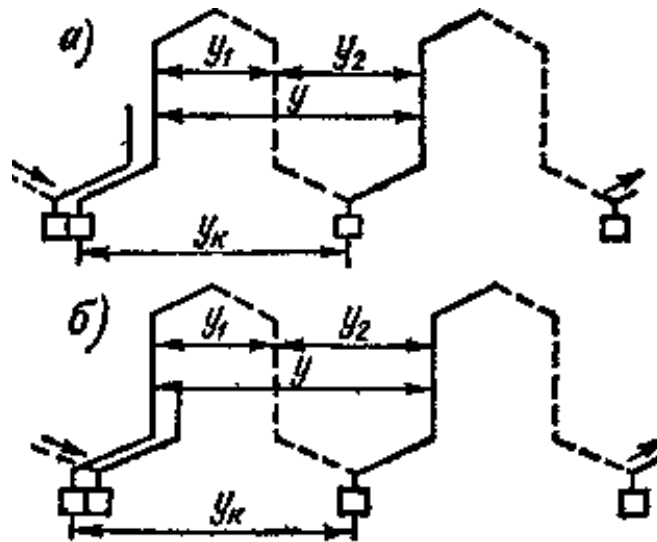


Рис. 1.21. Секции неперекрещенной *а* и перекрещенной *б* простой волновой обмотки

Шаг y_1 определяется по формуле:

$$y_2 = y - y_1. \quad (1.16)$$

Шаги y_1 и y_2 близки к τ_{II} , а $y_k = y - k 2\tau_{II}$.

Построим схему-развертку для волновой обмотки при $Z = Z_{\vartheta} = S = K = 17$ и $2p = 4$.

Шаги обмотки будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} y_k = y &= \frac{K-1}{p} = \frac{17-1}{2} = 8; \\ y_1 &= \frac{Z_{\vartheta}}{2p} - \varepsilon = \frac{17}{4} - \frac{1}{4} = 4; \\ y_2 &= y - y_1 = 8 - 4 = 4. \end{aligned}$$

Порядок соединений секционных сторон обмотки представлен на рис. 1.22, а схема-развертка простой волновой обмотки имеет вид, показанный на рис. 1.23. Ряд секций, выделенных на рис. 1.23 жирными линиями, в отличие от секций петлевых обмоток замыкается накоротко через две щетки одной полярности и соединительные провода между ними. Короткозамкнутые секции обведены рамкой также и на рис. 1.22.

Поскольку каждая из ветвей простой волновой обмотки проходит под всеми полюсами, то неравенство потоков полюсов не вызывает неравенства ЭДС и токов параллельных ветвей. Поэтому такая обмотка не нуждается в уравнивательных соединениях.

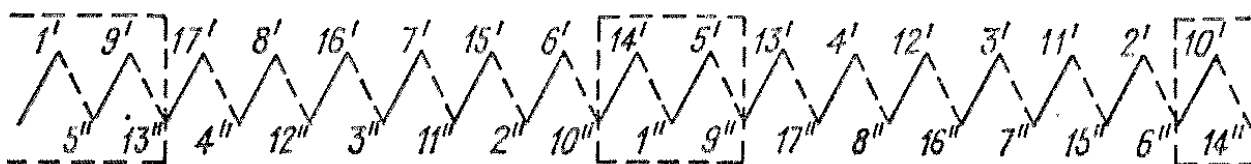


Рис. 1.22. Соединения секционных сторон простой волновой обмотки

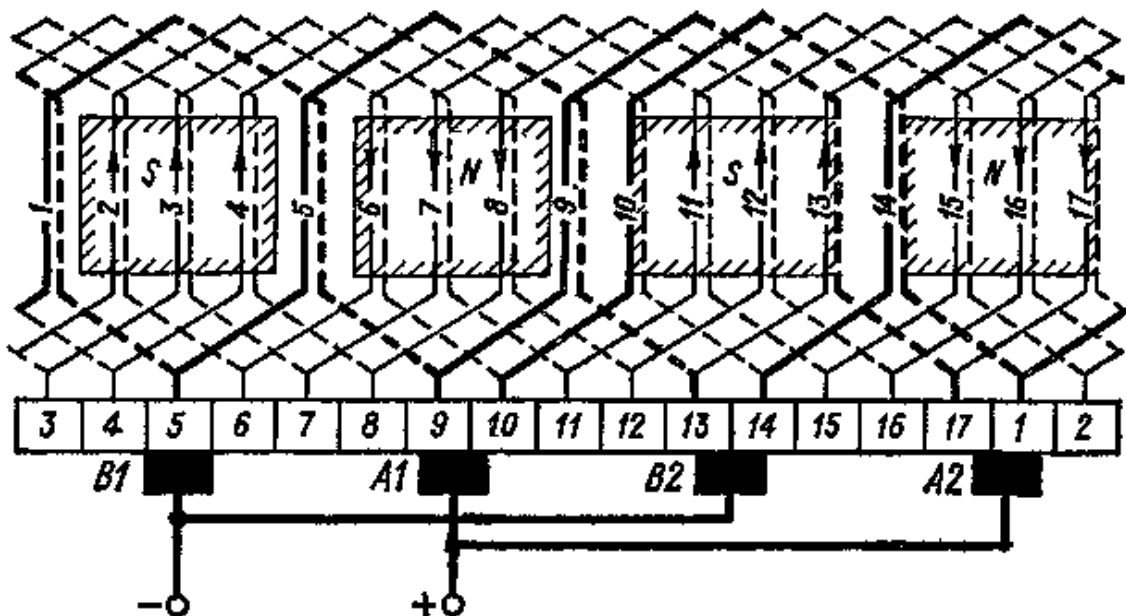


Рис. 1.23. Схема-развертка простой волновой обмотки с
 $2p = 4$, $Z = Z_s = S = K = 17$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $y_k = 8$

При волновой обмотке на коллекторе можно установить только два щеточных пальца, например, $A1$ и $B2$, как показано на рис. 1.23, так как все щетки данной полярности соединены короткозамкнутыми секциями, через которые ток нагрузки распределяется по параллельно работающим щеткам каждой полярности. Два щеточных пальца примут на себя весь ток нагрузки, и короткозамкнутых секций не будет.

Эта возможность иногда используется в машинах мощностью до 0,5 кВт, если доступ для ухода за щетками по всей окружности коллектора затруднен. Однако условия коммутации при этом ухудшаются. Кроме того, в более мощных машинах возникает необходимость удлинять коллектор. Поэтому обычно ставится полный комплект ($2p$) щеточных пальцев.

Обычно простые волновые обмотки якорей машин постоянного тока применяют в машинах мощностью до 50 кВт на напряжение 110 В и до 500 кВт на напряжение 440 В или 600 В.

Сложная волновая обмотка

Сложную волновую обмотку можно рассматривать как сочетание m простых волновых обмоток, которые включаются на параллельную работу с помощью щеток.

Число параллельных ветвей такой обмотки соответственно в m раз больше числа ветвей простой волновой обмотки:

$$2a = 2m. \quad (1.17)$$

Рассматриваемую обмотку называют также сложной последовательной обмоткой. Выполнение симметричных m -ходовых волновых обмоток возможно при условии:

$$\frac{2p}{m} = \text{целое число} . \quad (1.18)$$

Максимально возможное число ходов при этом равно $m = 2p$, а максимальное число ветвей определяется выражением $2a = 4p$, т. е. такое же, как у двухходовой петлевой обмотки. Секции и коллекторные пластины m -ходов обмотки по окружности чередуются. Поэтому после одного обхода p последовательно соединенных секций вокруг якоря должны выйти не к соседней исходной пластине коллектора, как при простой волновой обмотке, а со сдвигом на m делений влево или вправо. В соответствии с этим можно записать следующие выражения:

$$py_k \pm m = K ; \quad (1.19)$$

$$y_k = y = \frac{K \mp m}{p} = \frac{K \mp a}{p} . \quad (1.20)$$

Шаги y_1 и $y_2 = y - y_1$ определяются обычным образом. Кратность замыкания обмотки равна общему наибольшему делителю чисел m и K .

1.4 Выбор типа обмотки. Уравнительные соединения

Выбор типа обмотки

Исходя из рациональных в практическом отношении размеров пазов, проводников обмотки якоря, коллекторных пластин и щеток, а также из условий коммутации, ток параллельной ветви ограничивают значениями $i_a = 300 - 350$ А, а в отдельных случаях $i_a = 400 - 450$ А. С другой стороны, в машинах малой мощности для получения заданного значения номинального напряжения U_n из-за малых значений магнитного потока Φ требуется большое число витков в ветви обмотки, что ограничивает сечение проводников и тока i_a . Поэтому в таких машинах применяется обмотка с минимальным числом ветвей, т. е. простая волновая обмотка, а в машинах больших мощностей – другие типы обмоток.

Соответственно этому при $U_n = 220$ В простая волновая обмотка используется до номинальных мощностей $P_n = 80 - 100$ кВт, сложная волновая обмотка – при $P_n = 150 - 300$ кВт, а простая петлевая обмотка – при $P_n = 150 - 500$ кВт и выше. Сложные петлевые обмотки применяются в машинах низкого напряжения ($U_n < 50$ В) на большие токи и в крупных машинах нормального и повышенного напряжения ($U_n > 110$ В). При других напряжениях указанные мощности изменяются пропорционально U_n .

Комбинированные обмотки находят некоторое применение в машинах предельной мощности и при тяжелых режимах работы (быстро меняющиеся нагрузки и т. д.). На выбор типа обмотки влияет также число полюсов, частота вращения и т. д.

Значение $u_n = 1$ используется только в машинах низкого напряжения при больших токах. При $U_n = 220$ В и $P_n = 30 - 50$ кВт число витков в секции всегда равно единице.

Уравнительные соединения

Расстояние между двумя соседними равнопотенциальными точками называют *потенциальными уравнительным шагом*, измеряемым числом коллекторных делений или числом секций, соответствующих одной паре ветвей:

$$y_n = \frac{K}{a} = \frac{S}{a} = \frac{K}{p}. \quad (1.21)$$

Полное число уравнительных соединений первого рода равно:

$$N_{yp} = \frac{K}{a}. \quad (1.22)$$

В целях экономии меди и упрощения машины обычно применяют неполное число уравнителей из медного провода с сечением, равным 1/2, 1/4 сечения проводника обмотки якоря.

Уравнители первого рода располагают со стороны коллектора под передними лобовыми частями обмотки якоря. Если простые волновые обмотки не требуют никаких уравнительных соединений, то сложные волновые обмотки хорошо работают при выполнении их с уравнительными соединениями. В сложной волновой обмотке соединения коллекторных пластин принадлежат разным простым волновым обмоткам. Если переходные сопротивления между щетками и коллекторными пластинами, принадлежащим разным обмоткам, не равны, то и токи в отдельных волновых обмотках также не равны. Неравномерное распределение тока повлечет за собой падение напряжения в обмотках, вследствие чего напряжение между соседними коллекторными пластинами может сильно увеличиться. Для устранения этого недостатка соединяют уравнительными проводами такие точки простых волновых обмоток, которые теоретически должны иметь одинаковые потенциалы.

Уравнительные соединения, выравнивающие несимметрию распределения напряжения по коллектору, называют *уравнителями второго рода*.

Таким образом уравнители первого рода выравнивают несимметрию магнитной системы машины, а уравнители второго рода – несимметрию распределения напряжения по коллектору. Уравнительные соединения применяют не только в сложных волновых, но и в сложных петлевых обмотках.

В комбинированных обмотках простая волновая обмотка выполняет функции уравнительных соединений первого рода для простой петлевой обмотки, а

простая петлевая обмотка выполняет функции уравнительных соединений второго рода для простой волновой обмотки.

Иногда в машинах с тяжелыми условиями коммутации в двухходовых петлевых обмотках применяют также *уравниватели третьего рода*. Их задача сводится к тому, чтобы при вращении коллектора щетка замыкала накоротко не сразу всю секцию, а сначала одну её половину и затем другую.

1.5 Магнитная цепь машины постоянного тока

Основным магнитным потоком Φ_δ называется поток в воздушном зазоре δ , приходящийся на один главный полюс машины. Величина Φ_δ определяет значение индуктируемой в обмотке якоря ЭДС. Магнитный поток в МПТ создается под действием МДС обмоток возбуждения главных полюсов. Этот поток замыкается в машине между разноименными полюсами по определенному пути, который называется *магнитной цепью* машины.

Магнитная цепь МПТ изображена на рис. 1.24. Обычно магнитная цепь симметрична и имеет пять характерных однородных участков: главные полюсы h_m , воздушный зазор δ , зубцы якоря h_z , сердечник якоря L_a и станину (ярмо) L_π . Магнитный поток, создаваемый каждым из полюсов, делится относительно продольной оси полюса на две части, образующие вместе с соседними полюсами два одинаковых магнитных контура. Число таких контуров равно числу полюсов. Расчет магнитной цепи происходит при холостом ходе (х. х.) машины, когда ток якоря $I_a = 0$, и заключается в определении МДС, необходимой для создания под главными полюсами МПТ основного магнитного потока требуемой величины.

Целью расчета магнитной цепи МПТ является определение площадей сечений ее участков и степени ее насыщения.

Вследствие симметрии устройств машины и равенства потоков всех полюсов достаточно рассмотреть магнитную цепь одной пары полюсов.

На рис. 1.24 для каждого полюса штриховой линией показана такая магнитная линия магнитного потока Φ_δ , длину которой можно считать средней для всех магнитных линий.

Магнитную цепь можно рассчитать на основе закона полного тока для средней магнитной линии:

$$\int H d\ell = \sum i, \quad (1.23)$$

где H – напряженность магнитного поля;

$d\ell$ – элемент длины магнитной линии;

$\sum i$ – полный ток, охватываемый магнитной линией.

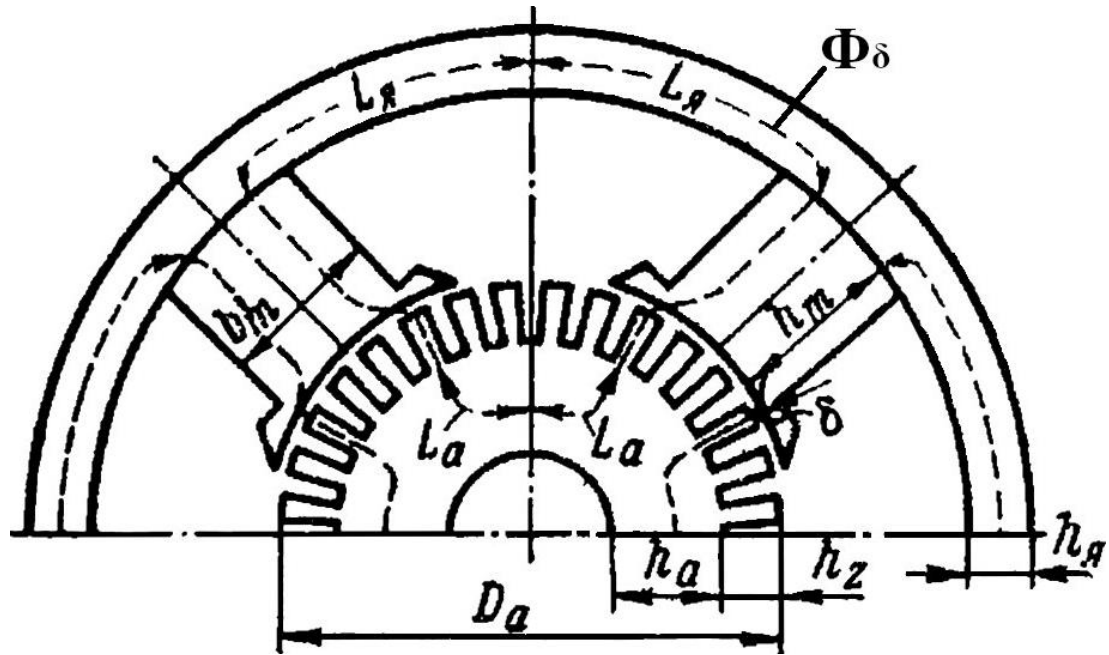


Рис. 1.24. Магнитная цепь машины постоянного тока

Предположив, что на протяжении каждого однородного участка напряженность магнитного поля H , соответственно, постоянна, заменяем интеграл суммой:

$$\int H_k \ell_k = \sum I = F_0. \quad (1.24)$$

где H_k – напряженность магнитного поля на каждом однородном участке;

ℓ_k – средняя длина однородного участка;

F_0 – полная МДС пары полюсов, действующая в контуре цепи.

Тогда вместо равенства 1.23 получим следующее выражение:

$$2H_{\delta}\delta + 2H_z h_z + 2H_a L_a + 2H_m h_m + 2H_{\delta} L_{\delta} = 2w_{\delta} i_{\delta}, \quad (1.25)$$

где δ , h_z , L_a , h_m , L_{δ} – показанные на рис. 1.24 геометрические размеры, равные длинам отрезков средней магнитной линии;

H_{δ} , H_z , H_a , H_m , H_{δ} – напряженности магнитного поля в воздушном зазоре, в зубцах якоря, в ярме якоря, в сердечнике полюса, в ярме станины;

w_{δ} – число витков обмотки возбуждения, приходящихся на один главный полюс машины;

i_{δ} – ток возбуждения.

Отдельные члены соотношения (1.25) представляют собой МДС отдельных участков магнитной цепи, а их сумма – полную МДС машины на пару полюсов.

Так как для каждого участка магнитной цепи МДС определяется выражением $F = H\ell$, то равенство 1.25 можно заменить соотношением:

$$2F_{\delta} + 2F_z + 2F_a + 2F_m + 2F_{\delta} = 2F_{\delta} = 2w_{\delta} i_{\delta}, \quad (1.26)$$

где F_g – полная МДС, приходящаяся на один главный полюс машины.

При расчете магнитной цепи, исходя из заданного значения ЭДС E_a и пропорциональной ей величины магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ , определяют значения H на отдельных участках цепи, предполагая при этом, что поток распределяется равномерно по сечениям этих участков, и затем вычисляют сумму по формуле 1.25 или 1.26. Подобный приближенный расчет дает достаточную для технических целей точность. При этом расчет ведется на один полюс, т. е. вычисляется половина суммы (1.25).

Сложив вычисленные МДС участков магнитной цепи, получим МДС машины постоянного тока, приходящуюся на один полюс:

$$F_g = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_y, \quad (1.27)$$

где $F_g = w_g i_g$.

Если повторить расчет F_g для ряда значений основного потока Φ_δ , то можно построить зависимости $\Phi_\delta = f(F_g)$ или $\Phi_\delta = f(i_g)$ (рис. 1.25, кривая 1) которые отличаются только масштабом по оси абсцисс. Такие зависимости называются *кривыми намагничивания* или *магнитными характеристиками* машины.

Начальная, прямолинейная часть магнитной характеристики соответствует ненасыщенному состоянию магнитной цепи, когда МДС ферромагнитных участков этой цепи весьма малы по сравнению с F_δ . Поэтому, если провести касательную 2 к начальной части кривой 1 (рис. 1.25), то она представит собой зависимость $\Phi_\delta = f(F_\delta)$. Разность абсцисс кривой 1 и прямой 2 равна сумме МДС ферромагнитных участков магнитной цепи.

Степень насыщения магнитной цепи характеризуется *коэффициентом насыщения*:

$$k_\mu = \frac{F_g}{F_\delta} = 1 + \frac{F_z + F_a + F_m + F_y}{F_\delta}, \quad (1.28)$$

который можно определить также по магнитной характеристике машины (рис. 1.25), т. е. по выражению 1.29:

$$k_\mu = \frac{AC}{AB} = 1 + \frac{BC}{AB}. \quad (1.29)$$

Строить машину с ненасыщенной магнитной цепью невыгодно, так как при этом материалы будут недоиспользованы и машина получится тяжелой. Нецелесообразно также строить машину с чрезвычайно насыщенной магнитной цепью, так как в этом случае F_g велико и необходимо выполнить мощную обмотку возбуждения с большим расходом меди или алюминия и с большими потерями мощности на возбуждение. По этим причинам электрические машины изготавливаются с умеренным насыщением при номинальном режиме. При этом рабочая

точка лежит несколько выше колена магнитной характеристики (около точки C на рис. 1.25). Обычно при номинальном магнитном потоке $k_\mu = 1,20 \div 1,35$, а в некоторых случаях $k_\mu = 1,7 \div 2,0$.

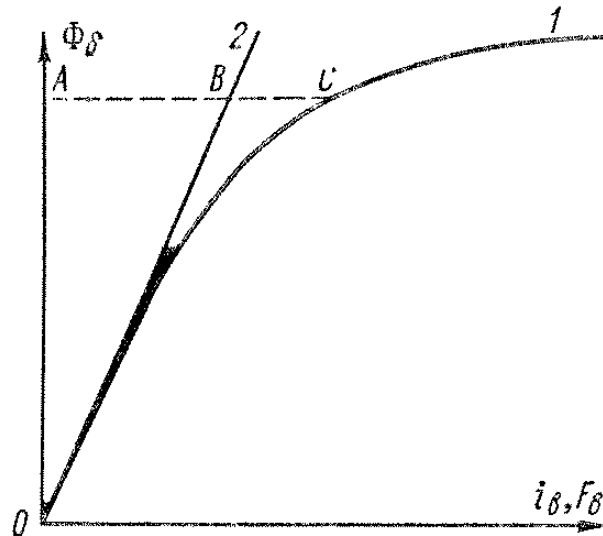


Рис. 1.25. Магнитная характеристика машины постоянного тока

При проектировании МПТ сечения участков магнитной цепи выбираются обычно таким образом, чтобы при номинальном режиме значения магнитной индукции находились в определенных заданных пределах. Кроме того, в последнее время для изготовления полюсов применяется также холоднокатаная электро-техническая сталь. При этом в главных полюсах допускается $B_m = 1,8 \text{ Тл}$.

1.6 Основные электромагнитные соотношения машин постоянного тока

ЭДС якоря МПТ вычисляется по формуле:

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi_\delta n, \quad (1.30)$$

или

$$E_a = c_e \Phi_\delta n, \quad (1.31)$$

где c_e – электрическая постоянная:

$$c_e = \frac{pN}{60a}. \quad (1.32)$$

Если вместо величины n ввести в формулу 1.30 угловую частоту вращения:

$$\omega = 2\pi n, \quad (1.33)$$

то ЭДС якоря будет равна:

$$E_a = c_M \Phi_\delta \omega, \quad (1.34)$$

где c_m – магнитная постоянная:

$$c_m = \frac{c_e}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a}. \quad (1.35)$$

Электромагнитный момент МПТ определяется по выражению:

$$M_{эм} = c_m \Phi_\delta I_a, \quad (1.36)$$

где I_a – ток якоря.

Электромагнитная мощность МПТ вычисляется по формуле:

$$P_{эм} = E_a I_a = M_{эм} \omega. \quad (1.37)$$

К основным *электромагнитным нагрузкам МПТ* относят: магнитную индукцию в воздушном зазоре B_δ , линейную нагрузку A_a и плотность тока j_a .

Магнитная индукция – это величина магнитного потока, приходящаяся на единицу поперечного сечения магнитопровода:

$$B = \frac{\Phi}{S}. \quad (1.38)$$

Линейная нагрузка – это ток, приходящийся на единицу длины окружности якоря:

$$A_2 = \frac{I_a N}{\pi 2a D_a}, \quad (1.39)$$

где I_a – ток якоря;

N – число проводников обмотки якоря;

$2a$ – число параллельных ветвей.

1.7 Щетки новой конструкции

В 1999 г. в Ростовском государственном университете путей сообщения на кафедре «Электрические машины и аппараты» было разработано устройство токосъема со щетками новой конструкции и получен патент РФ на его изобретение (рис. 1.26).

Данное устройство включает в себя щетку 2, разрезанную в продольном направлении, установленную в щеткодержателе 3 и контактирующую с коллектором 1. Нагрузочное устройство 4 плотно прижимает щетку к коллектору. В разрез щетки, а также между ней и коллектором введена смазка 5, содержащая порошковый электропроводящий наполнитель и заполняющая пространство между неровностями профиля шероховатости рабочей поверхности коллектора. Количество электропроводящего наполнителя составляет 2÷15 % от объема смазочного материала. Кроме того, в смазочный материал, находящийся только в

разрезе щетки, помимо порошкового наполнителя, дополнительно введены электропроводящие углеродистые или медные нити 6, расположенные вертикально.

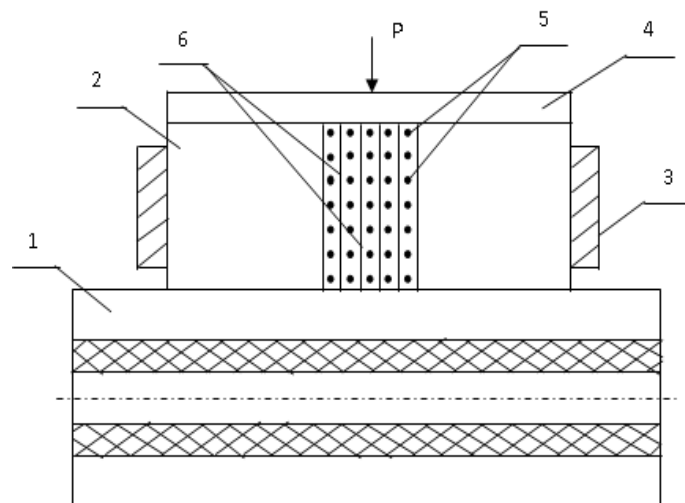


Рис. 1.26. Устройство токосъема со щетками новой конструкции:
 1 – коллектор; 2 – щетка; 3 – щеткодержатель; 4 – нагружающее устройство;
 5 – электропроводящая смазка; 6 – электропроводящие углеродные нити;
 P – усилие, прижимающее щетку

Принцип работы данного устройства следующий.

Если разрезанную щетку приложить к коллектору и привести его во вращение, то смазочный материал обязательно попадет в зону трения. При этом в контактный зазор попадут тоже и частицы электропроводящего порошкового наполнителя, образуя мостики дополнительной проводимости от щетки к коллектору и наоборот. В этом случае электропроводящие нити позволят повысить надежность работы КЩУ за счет одновременного уменьшения искрения между коллектором и щеткой и увеличения в разрезе щетки электрической проводимости. Также при этом снизится и износ токопроводящего скользящего контакта коллектор-щетka.

Экспериментальным путем было установлено, что применение щеток новой конструкции позволило повысить КПД тягового двигателя и улучшить коммутацию на один класс.

2 РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И КОММУТАЦИЯ МПТ

2.1 Реакция якоря МПТ и ее виды

Магнитное поле двухполюсной машины постоянного тока, создаваемое обмоткой возбуждения, при холостом ходе ($I_a = 0$) представлено на рис. 2.1.

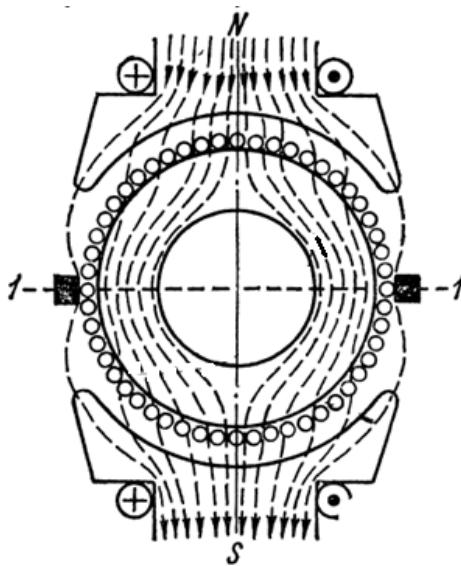


Рис. 2.1. Магнитное поле МПТ при х. х.

При нагрузке машины ($I_a \neq 0$) обмотка якоря создает собственное магнитное поле, которое при установке щеток на геометрической нейтрали и при отсутствии возбуждения ($i_g = 0$) изображено на рис. 2.2.

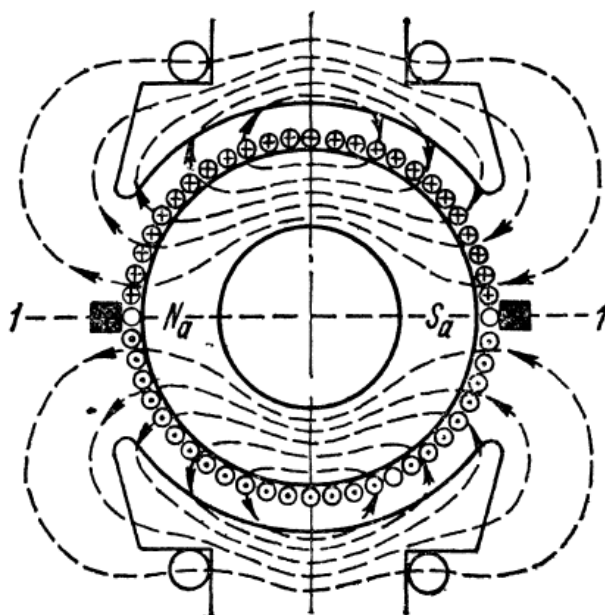


Рис. 2.2. Магнитное поле МПТ при нагрузке

Как видно из рис. 2.2, ось поля якоря направлена по оси щеток 1-1, т. е. по линии геометрической нейтрали. Линия на поверхности якоря, проходящая в

осевом направлении посередине между двумя соседними полюсами, называется *линией геометрической нейтрали* или *геометрической нейтралью*, так как вдоль этой линии магнитная индукция $B = 0$. Развиваемый в машине электромагнитный момент можно рассматривать как результат взаимодействия полюсов поля якоря $N_a - S_a$ и полюсов поля возбуждения $N - S$.

Магнитные поля якоря и индуктора, действующие совместно, образуют результирующее поле, вид которого показан на рис. 2.3. Полярность полюсов и направления токов якоря на этом рисунке соответствуют случаю, когда в режиме генератора (Γ) якорь вращается по часовой стрелке, а в режиме двигателя (Δ) – против часовой стрелки.

Из рис. 2.3 видно, что под влиянием поля якоря основное магнитное поле главных полюсов машины изменяется. Это явление называется *реакцией якоря*.

При установке щеток на геометрической нейтрали 1-1 поле якоря направлено поперек оси полюсов, и в этом случае оно называется *полем поперечной реакции якоря*. Поперечная реакция якоря вызывает ослабление поля под одним краем полюса и его усиление под другим, вследствие чего ось результирующего поля поворачивается в генераторе по направлению вращения якоря, а в двигателе – в обратную сторону. Если условно рассматривать линии магнитной индукции в качестве упругих нитей, то возникновение электромагнитного момента можно рассматривать как результат действия упругих сил этих нитей, стремящихся сократиться и повернуть якорь. При такой трактовке явлений направления действия моментов совпадают с реальными как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

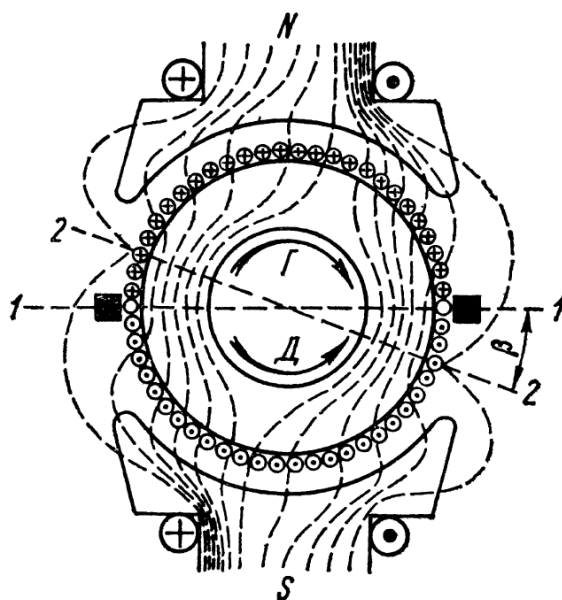


Рис. 2.3. Результирующее магнитное поле МПТ

Под воздействием поперечной реакции якоря нейтральная линия на поверхности якоря, на которой $B = 0$, поворачивается из положения геометрической нейтрали 1-1 на некоторый угол β в положение 2-2, которое называется

линией физической нейтрали. В генераторе физическая нейтраль повернута в сторону вращения якоря, а в двигателе – в обратную сторону.

Из рис. 2.2 следует, что при вращении якоря в проводниках, показанных в левой части рис. 2.2, поле поперечной реакции якоря индуцирует ЭДС одного направления, а в правой – другого. В результате этого при установке щеток на геометрической нейтрали суммарная ЭДС от поля реакции якоря в каждой параллельной ветви обмотки и на щетках равна нулю.

Если щетки сдвинуты с геометрической нейтрали на 90° эл. (рис. 2.4), то поле якоря действует вдоль оси полюсов и называется *полем продольной реакции якоря*. Это поле в зависимости от направления тока в якоре оказывает на поле полюсов намагничивающее или размагничивающее действие, и в результате его взаимодействия с полем полюсов электромагнитный момент не возникает. Индуцируемая при вращении якоря ЭДС на щетках будет в этом случае также равна нулю.

Обычно щетки устанавливаются на геометрической нейтрали. Однако в результате неточной установки щеток, а также сознательных действий персонала щетки могут быть сдвинуты с геометрической нейтрали на некоторый угол α (рис. 2.5, а), причем $0 < \alpha < 90^\circ$ эл. В таком общем случае поверхность якоря на протяжении двойного полюсного деления можно разбить на две пары симметричных секторов: 1) ab и gv , 2) ag и bv . Токи первой пары секторов (рис. 2.5, б) создают поле поперечной реакции якоря, а токи второй пары (рис. 2.5, в) – поле продольной реакции якоря.

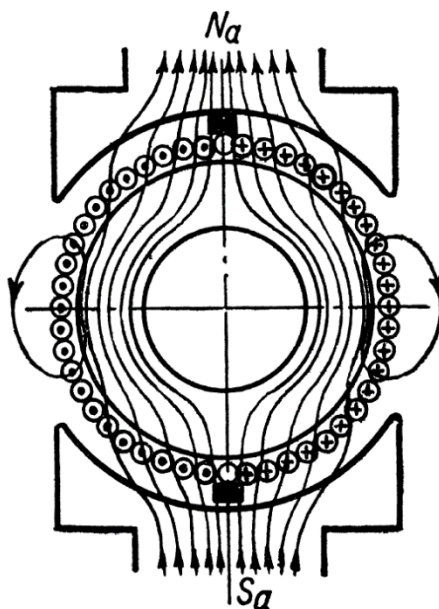


Рис. 2.4. Поле продольной реакции якоря

Указанные на рис. 2.5, а полярности полюсов и направления токов якоря соответствуют вращению якоря в режиме генератора (I) по часовой стрелке, а в режиме двигателя (D) – против часовой стрелки.

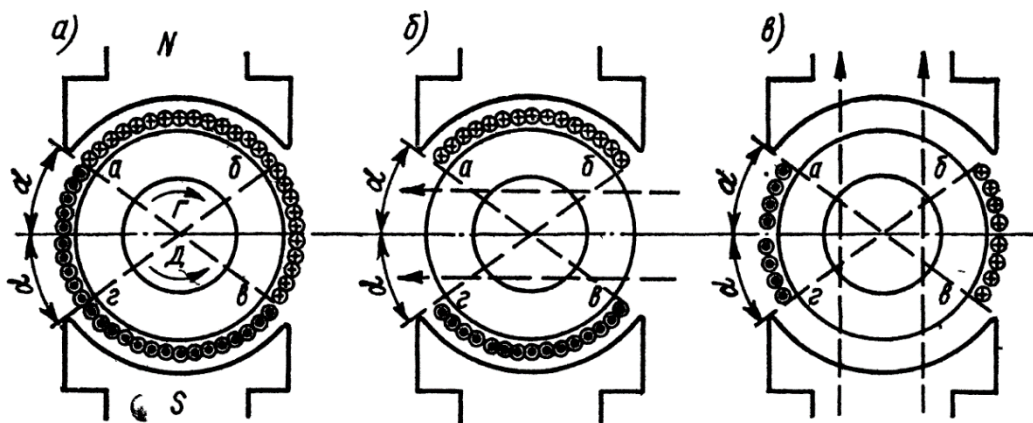


Рис. 2.5. Разложение МДС реакции якоря при сдвиге нейтрали a на поперечную $б$ и продольную $в$

Как следует из рис. 2.5, при повороте щеток генератора в направлении вращения и щеток двигателя против направления вращения возникает размагничивающая продольная реакция якоря, вызывающая уменьшение магнитного потока полюсов. Основную роль в компенсации поперечной реакции якоря в современных МПТ играют добавочные полюсы, магнитный поток которых направлен встречно потоку якоря.

2.2 Напряжение между коллекторными пластинами

Реакция якоря в определенных условиях может вызвать нежелательные по своим последствиям явления. К числу таких явлений относится, прежде всего, увеличение напряжения между коллекторными пластинами вследствие искажения паля под воздействием поперечной реакции якоря. Это напряжение называется *межламельным*.

При х. х. максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами в случае, например, применения простой петлевой обмотки определяется по выражению:

$$u_{\kappa} = 2B_{\delta} w_c \ell_{\delta} v_a, \quad (2.1)$$

где w_c — число витков секции.

При нагрузке максимальная индукция под одним из краев полюса достигает некоторого значения $B_{\text{макс}}$, поэтому максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами вычисляется по формуле:

$$u_{\kappa.\text{макс}} = 2B_{\delta.\text{макс}} w_c \ell_{\delta} v_a. \quad (2.2)$$

Следовательно, отношение напряжений будет равно:

$$\frac{u_{\kappa.\text{макс}}}{u_{\kappa}} = \frac{B_{\delta.\text{макс}}}{B_{\delta}}. \quad (2.3)$$

Среднее напряжение между соседними коллекторными пластинами определяется по выражению:

$$u_{к.ср} = 2B_{\delta ср} w_c \ell_{\delta} v_a = 2\alpha_{\delta} B_{\delta ср} w_c \ell_{\delta} v_a. \quad (2.4)$$

Следовательно, отношение напряжений будет равно:

$$\frac{u_{к.макс}}{u_{к.ср}} = \frac{B_{\delta макс}}{\alpha_{\delta} B_{\delta}}. \quad (2.5)$$

При расчете МПТ число коллекторных пластин K выбирается таким, чтобы среднее напряжение между соседними коллекторными пластинами не превышало 14–22 В:

$$u_{к.ср} = \frac{2pU_n}{K}. \quad (2.6)$$

Согласно выражениям 2.5 и 2.6, максимальное межламельное напряжение вычисляется по формуле:

$$u_{к.макс} = \frac{2pU_n}{K} \cdot \frac{B_{\delta макс}}{\alpha_{\delta} B_{\delta}}. \quad (2.7)$$

Предельное значение $u_{к.макс}$ ограничивается возможностью возникновения электрической дуги между смежными пластинами. Поэтому обычно требуется, чтобы $u_{к.макс} \leq 30 \div 50$ В.

Недопустимое повышение $u_{к.макс}$ может произойти либо вследствие увеличения $B_{\delta макс}$ под воздействием реакции якоря (например, значительная перегрузка машины), либо вследствие уменьшения B_{δ} (двигатели с регулированием скорости в широких пределах).

Искажение кривой поля тем значительнее, чем меньше воздушный зазор. Величину зазора в машинах средней и большой мощности выбирают обычно такой, чтобы при номинальном режиме индукция под краем полюса не меняла своего направления.

2.3 Компенсационная обмотка

Эффективным средством борьбы с искажением кривой поля и увеличением напряжения между коллекторными пластинами является применение компенсационной обмотки.

Она размещается в пазах, выштампованных в полюсных наконечниках (рис. 2.6, а), так, чтобы направления токов в этой обмотке и обмотке якоря в пределах каждого полюсного деления были противоположны. Если линейные

нагрузки обеих обмоток равны ($A_a = A_{к.о}$), то влияние поперечной реакции якоря в пределах полюсного наконечника устраняется полностью (рис. 2.6, б). Последовательное соединение этих обмоток обеспечивает такую компенсацию при всех нагрузках. Однако соблюдение условия $A_a = A_{к.о}$ в точности не всегда возможно.

В таких случаях в пределах полюсного наконечника сохраняется некоторое влияние поперечной реакции якоря и максимальное значение МДС реакции якоря в нейтральной зоне также увеличивается:

$$F_{ак} = \frac{A_a \tau}{2} - \frac{A_{к.о} b_{\delta}}{2}. \quad (2.8)$$

При наличии компенсационной обмотки величину воздушного зазора можно брать минимально допустимой по механическим условиям.

Компенсационная обмотка обычно применяется в мощных и быстроходных машинах, когда $U_n > 400 \div 450$ В, $\frac{P_n}{2p} > 80 \div 100$ кВт, машина подвергается перегрузкам более 20 % и коммутация затруднена (реактивная ЭДС $e_r > 5 \div 7$ В).

2.4 Коммутация машин постоянного тока

Природа проводимости в щеточном контакте

Коммутация в МПТ – это процесс изменения направления тока в секции обмотки якоря при переходе ее из одной параллельной ветви в другую. Во время коммутации секции замыкаются накоротко щетками, через которые ток из якоря передается во внешнюю цепь или из внешней цепи в якорь. Явления в щеточном контакте, т. е. между щетками и коллекторными пластинами, оказывают большое влияние на коммутацию и на исправную работу машины.

Передача тока от щетки к коллектору и обратно может осуществляться через:

- 1) непосредственный механический контакт между щеткой и коллектором;
- 2) мельчайшие частицы медной и графитной пыли;
- 3) ионизированные воздушные щели между щеткой и коллектором.

Соответственно говорят о зонах:

- 1) непосредственного контакта;
- 2) пылевидного контакта;
- 3) ионной проводимости.

Ввиду неровности микрорельефа непосредственный механический контакт, или соприкосновение щетки с коллекторными пластинами, происходит только на части контактной поверхности щетки и только в отдельных точках. Плотность тока в этих точках достигает нескольких тысяч ампер на квадратный миллиметр. Точечные контакты непостоянны ввиду их износа и разрушения, а также перемещения коллектора, причем время существования каждого точечного контакта в отдельности весьма невелико.

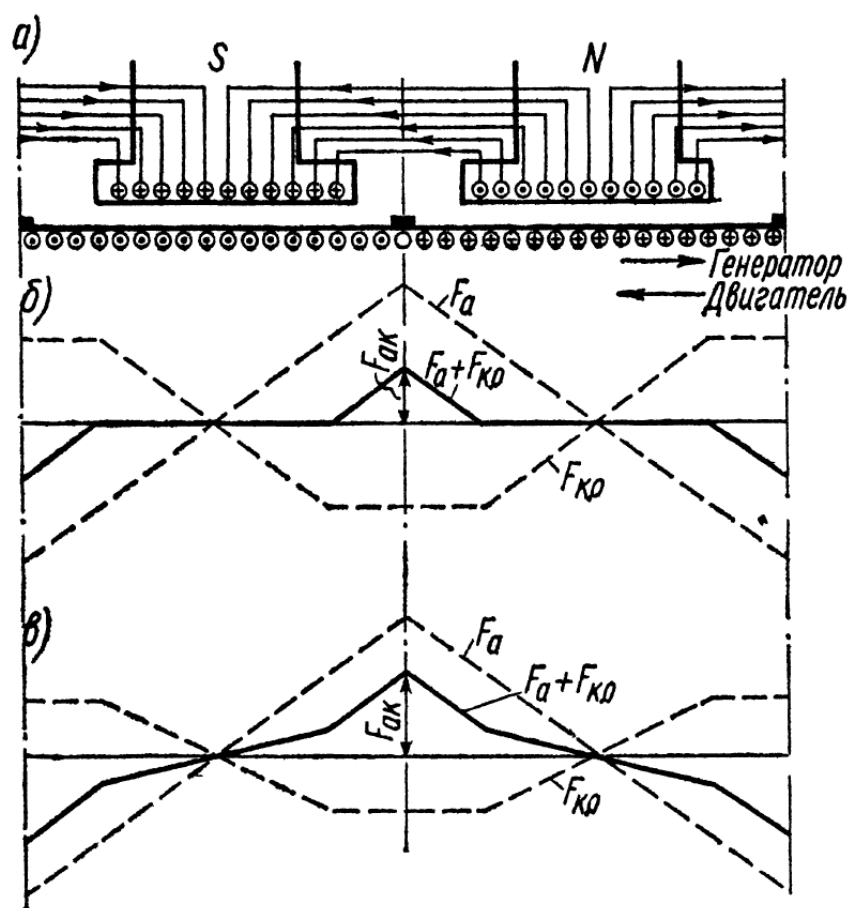


Рис. 2.6. Расположение компенсационной обмотки *a* и диаграммы МДС якоря (F_a), компенсационной обмотки ($F_{к.о}$) и результирующей МДС ($F_a + F_{к.о}$) при равенстве *б* и неравенстве *в* линейных нагрузок якоря и компенсационной обмотки

Вследствие износа щеток и коллектора в контактном слое всегда имеется множество мелких пылинок. Поэтому контакт и передача тока частично осуществляются через эти пылинки. Плотность тока при этом также велика, а продолжительность каждого контакта из-за движения коллектора и сгорания пылинок невелика.

Точки непосредственного и пылевидного контакта вследствие больших плотностей тока накаляются до красного и белого каления. При красном калении медь и щетки, поляризованные анодно, испускают ионы. При белом калении происходит термическая эмиссия электронов из катодно поляризованных щеток и пластин. Эмитирующие электроны, в свою очередь, ионизируют воздух в контактном слое. В результате этого создается ионная проводимость тока. В зоне ионной проводимости под щеткой возникают также слабые электрические искровые и дуговые разряды. Такие разряды появляются и на краях щеток при замыкании секций накоротко и их размыкании.

Разнородные зоны проводимости невелики по размерам, перемежаются друг с другом и перемещаются по контактной поверхности щетки. Ионная проводимость преобладает при больших плотностях тока под щеткой ($j_{щ} > 5 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$).

Искровые и дуговые разряды оказывают интенсивное термическое действие на материалы щетки и коллектора. Катод термически разрушается, и электродное вещество переносится с катода на анод. В результате этого происходит электрическая эрозия, следствием которой является перенос материала и износ электродов. Высокие температуры возникают лишь в отдельных точках, и поэтому щетки и коллекторные пластины в целом не нагреваются до высокой температуры.

В воздухе всегда есть влага, и все предметы покрыты тончайшей пленкой влаги, которая имеет определенную степень кислотности, так как в воздухе всегда содержатся различные окислы. Поэтому при прохождении тока через слой щеточного контакта возникает явление электролиза. В результате электролиза на коллекторе образуется блестящая пленка окислов меди, имеющая различную окраску (розовую, коричневую, фиолетовую, сине-стальную) и называемая *политурой*. Политура увеличивает переходное сопротивление щеточного контакта, ограничивает, тем самым, величину тока короткого замыкания (к. з.) секции и ухудшает коммутацию.

Наличие хорошей политуры на коллекторе является признаком хорошей коммутации. Зеркало щетки при хорошей коммутации имеет также блестящую поверхность.

Сильное искрение и дуговые разряды разрушают политуру и зеркальную поверхность щеток, контактные поверхности становятся матовыми и появляются следы нагара. Переходное сопротивление щеточного контакта при этом уменьшается, и условия коммутации ухудшаются.

Вследствие сложной природы щеточного контакта его переходное сопротивление не является постоянным, а зависит от величины тока. На рис. 2.7 сплошными линиями показаны две вольт-амперные характеристики щеток, представляющие собой зависимость падения напряжения в контактном слое щетки $\Delta U_{щ}$ от средней плотности тока под щеткой $j_{щ}$. Там же штриховыми линиями изображены кривые удельного переходного сопротивления в функции $j_{щ}$:

$$\rho_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{j_{щ}}. \quad (2.9)$$

На начальном, круто поднимающемся, участке кривых $\Delta U_{щ} = f(j_{щ})$ преобладает контактная проводимость, а на пологом участке — ионная проводимость.

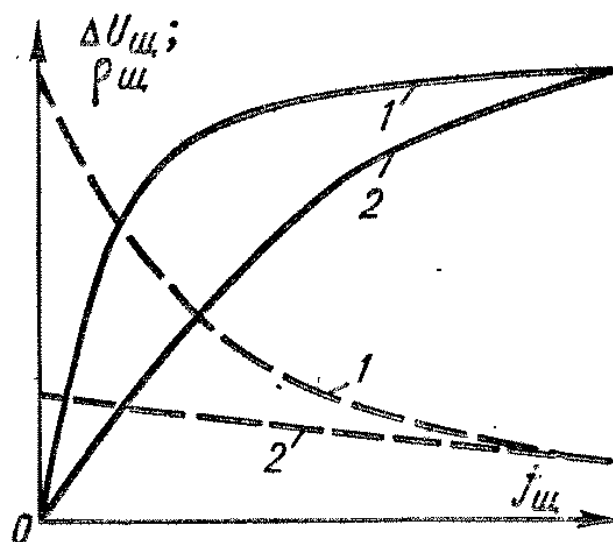


Рис. 2.7. Вольт-амперные характеристики щеток

Кривые 1 на рис. 2.7 соответствуют случаю, когда при малых $j_{щ}$ сопротивление $\rho_{щ}$ велико и начальная часть вольт-амперной характеристики круто поднимается. Такие щетки обеспечивают лучшие условия коммутации, чем щетки, соответствующие кривым 2.

Причины искрения

С практической точки зрения важно, чтобы коммутация происходила без значительного искрения у контактных поверхностей щеток, так как сильное искрение портит поверхность коллектора и щеток и делает длительную работу машины невозможной.

Причины искрения на щетках можно подразделить на:

- 1) механические;
- 2) электромагнитные.

Механические причины искрения большей частью связаны с нарушением контакта между щетками и коллектором.

Такие нарушения вызываются:

- 1) неровностью поверхности коллектора;
- 2) плохой пришлифовкой щеток к коллектору;
- 3) боем коллектора, если он превышает 0,2–0,3 мм;
- 4) выступанием отдельных коллекторных пластин;
- 5) выступанием слюды между коллекторными пластинами;
- 6) заеданием щеток в щеткодержателях (тугая посадка);
- 7) вибрацией щеток (нежесткость токосъемного аппарата, плохая балансировка машины, слишком свободное расположение щеток в щеткодержателях с зазорами более 0,2–0,3 мм, слишком большое расстояние между обоймой щеткодержателя и коллектором — более 2–3 мм и т. д.).

Искрение может быть вызвано также неравномерным натягом щеточных пружин, несимметричной разбивкой щеточных пальцев и щеток по окружности и другими причинами механического характера.

Электромагнитные причины искрения на щетках связаны с характером протекания электромагнитных процессов в коммутируемых секциях. Обеспечение достаточно благоприятного протекания этих процессов является важной задачей при создании МПТ, в особенности крупных.

Качество коммутации, согласно ГОСТ (табл. 2.1), оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегающим краем щетки, т. е. под тем краем, из-под которого пластины коллектора выходят при своем вращении. Степени искрения 1, $1\frac{1}{4}$ и $1\frac{1}{2}$ допускаются при любых режимах работы.

Потенциальное искрение

В определенных условиях возникают искровые разряды между отдельными коллекторными пластинами на свободной поверхности коллектора, не занятой щетками. Такое искрение называется *потенциальным*. Оно вызывается либо накоплением угольной пыли и грязи в канавках между соседними коллекторными пластинами, либо возникновением чрезмерных напряжений между соседними пластинами. Такое искрение опасно тем, что оно способно развиться в к. з. между пластинами и в так называемый круговой огонь.

Круговой огонь представляет собой короткое замыкание якоря машины через электрическую дугу на поверхности коллектора. Круговой огонь возникает в результате чрезвычайно сильного расстройств коммутации, когда под сбегающим краем щетки появляются сильные искры и электрические дуги (рис. 2.8).

Таблица 2.1

Степень искрения (класс коммутации) машин постоянного тока

| Степень искрения (класс коммутации) | Характеристика степени искрения | Состояние коллектора и щеток |
|--|---|---|
| 1 | Отсутствие искрения (темная коммутация) | — |
| $1\frac{1}{4}$ | Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки | Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках |
| $1\frac{1}{2}$ | Слабое искрение под большей частью щетки | Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протираанием поверхности коллектора бензином, а также следов |
| 2 | Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки | Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протираанием коллектора бензином, а также следов нагара на щетках |

| | | |
|---|--|--|
| 3 | Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и 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 устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток |
|---|--|--|

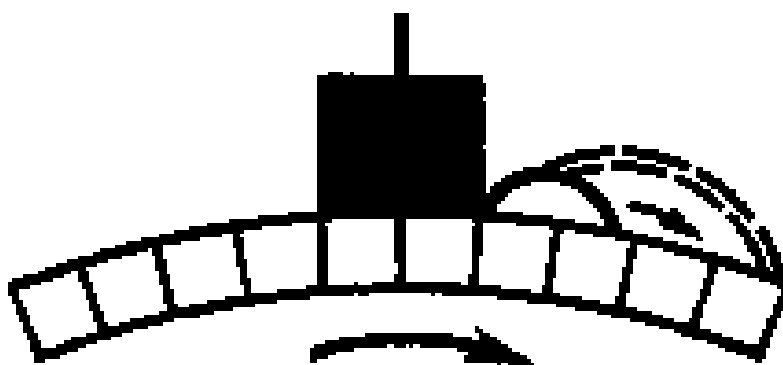


Рис. 2.8. Распространение кругового огня по коллектору

Распространение огня происходит путем повторных зажиганий дуги. Появляющаяся под щеткой дуга растягивается электродинамическими силами и гаснет, оставляя за собой ионизированное пространство. Поэтому последующая дуга возникает в более благоприятных условиях, является более мощной и растягивается на большее расстояние по коллектору, и, наконец, дуга может растянуться до щеток противоположной полярности.

Круговой огонь возникает обычно при больших толчках тока якоря (значительные перегрузки, короткие замыкания на зажимах машины или в сети и т. п.). При этом, с одной стороны, появляется сильное искрение («вспышка») под щеткой, а, с другой стороны, происходит значительное искажение кривой магнитного поля в воздушном зазоре и увеличение межламельного напряжения между отдельными коллекторными пластинами, что способствует возникновению кругового огня. Круговой огонь вызывает порчу поверхности коллектора и щеток.

Действенной мерой против возникновения кругового огня является применение компенсационной обмотки, а также быстродействующих выключателей, отключающих короткие замыкания в течение 0,05–0,10 сек.

Иногда в МПТ, при $U_n > 1000$ В, между щеточными bracketами разных полярностей ставятся также изоляционные барьеры, препятствующие распространению дуги (рис. 2.9), а также между коллектором и обмоткой устанавливают изолирующий экран и применяют воздушное дутьё, сдувающее дугу в сторону защищенного подшипника.

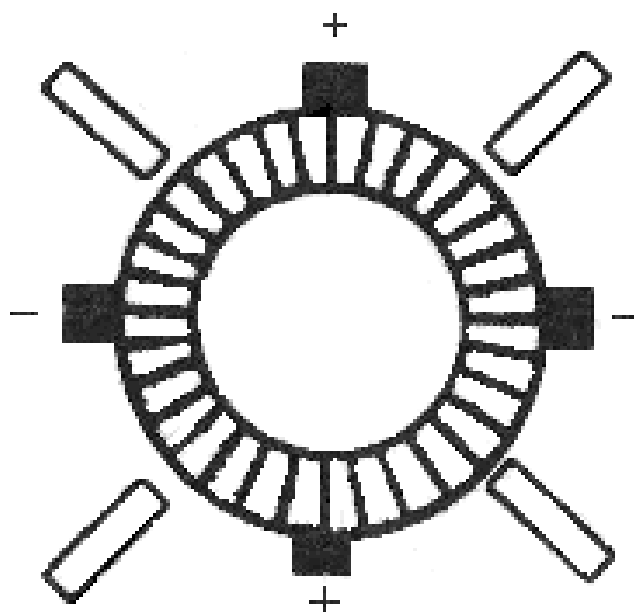


Рис. 2.9. Барьеры из изоляционного материала между щеточными bracketами

Электрическая дуга замыкает накоротко всю или значительную часть обмотки якоря, вследствие чего резко возрастает ток машины. Круговой огонь является крупной аварией. Образовавшаяся дуга сильно повреждает коллекторные пластины, изоляторы щеткодержателей и изоляцию лобовых частей машины, выводя ее из строя. В тяговых электродвигателях (ТЭД) дуга часто перебрасывается на ближайшие заземленные части машины – корпус и наконечник главного полюса (рис. 2.10), вызывая также тяжелые повреждения. Появление такой дуги называют *вспышкой на коллекторе* электрической машины (ЭМ).

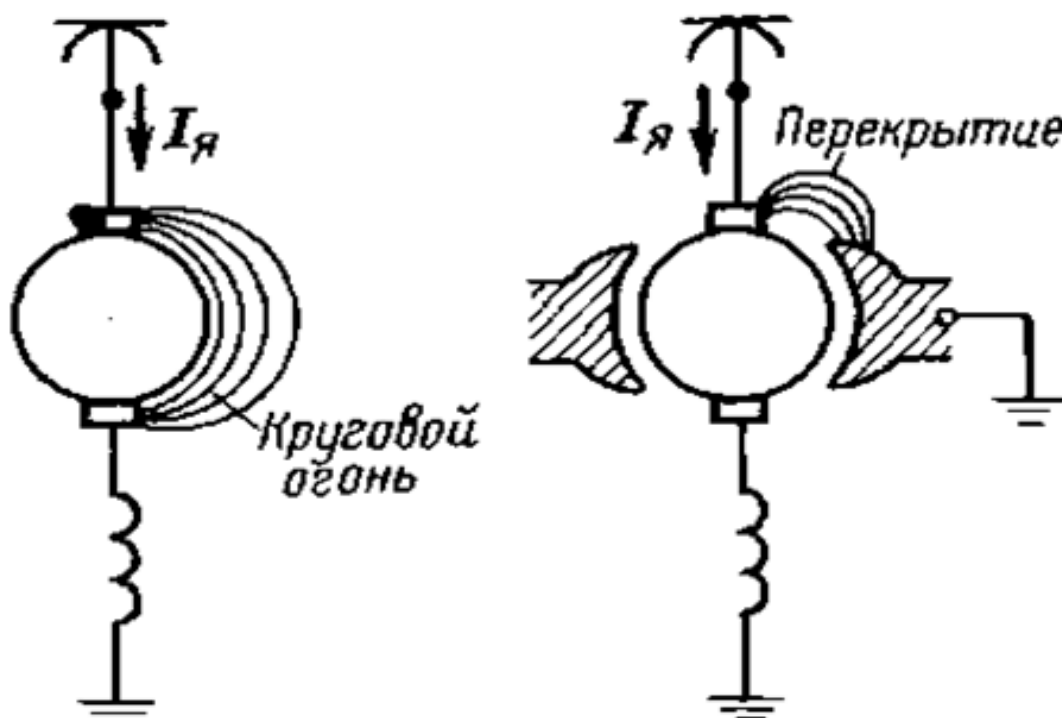


Рис. 2.10. Возникновение кругового огня в ТЭД

Процесс коммутации

При вращении якоря секции переходят попеременно из одной параллельной ветви в другую, причем во время такого перехода секция замыкается накоротко щеткой и в ней происходит изменение направления тока, например, от значения $+i_a$ до значения $-i_a$. Это явление называется *коммутацией секции*. Явления в короткозамкнутой секции влияют на величину токов в щеточном контакте и на работу щеток. Совокупность явлений, связанных с замыканием секций накоротко щетками, переходом этих секций из одних параллельных ветвей обмотки в другие и передачей тока через скользящий контакт между коллектором и щеткой, называется *коммутацией МПТ* (рис. 2.11).

Процесс коммутации характеризуется *периодом коммутации* T_κ , который представляет собой время (тысячные и десятитысячные доли секунды), в течение которого секция замкнута накоротко щеткой и коммутируется.

В случае простой петлевой обмотки T_κ равен времени перемещения коллектора, вращающегося с окружной скоростью v_κ , на ширину щетки $b_{щ}$:

$$T_\kappa = \frac{b_{щ}}{v_\kappa} = \frac{b_{щ}}{b_\kappa Kn} = \frac{\beta_\kappa}{Kn}, \quad (2.10)$$

где b_κ – ширина коллекторной пластины:

$$b_\kappa = \frac{\pi D_\kappa}{K}, \quad (2.11)$$

где D_κ – диаметр коллектора;

β_κ – коэффициент щеточного перекрытия, который находится в пределах 2–7:

$$\beta_\kappa = \frac{b_{щ}}{b_k}. \quad (2.12)$$

Электродвижущие силы в коммутируемой секции

Электродвижущие силы, индуцируемые в коммутируемой секции, оказывают на коммутацию весьма существенное влияние.

Коммутируемая секция обладает определенной индуктивностью L_c , вследствие чего в ней при коммутации индуцируется ЭДС *самоиндукции* вычисляемая по формуле:

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt}, \quad (2.13)$$

где L_c – индуктивность секции.

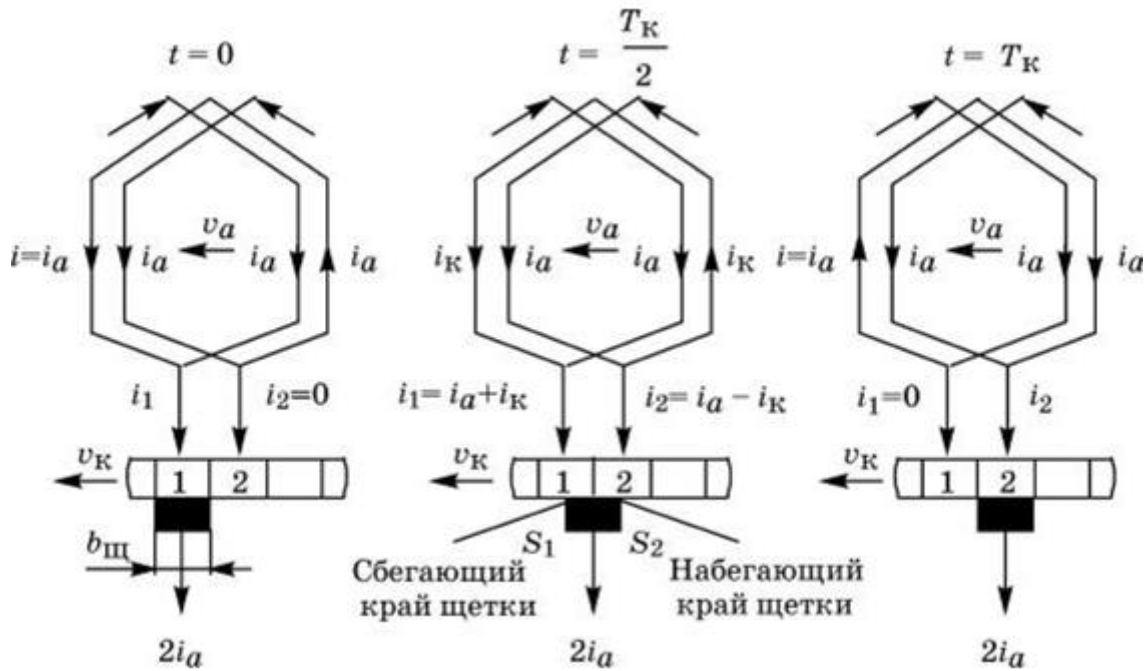


Рис. 2.11. Процесс коммутации МПТ

Знак минус в формуле 2.13 означает, что данная ЭДС стремится замедлить коммутацию, что вполне естественно, т. к. в результате самоиндукции изменение тока в цепи всегда замедляется.

Одновременно с рассматриваемой секцией в машине коммутируется ряд других секций. Обычно $b_{щ} > b_k$ и щетки замыкают накоротко несколько соседних секций. Если эти секции находятся в одном и том же пазу (число элементарных пазов $u_n > 1$), то между ними существует сильная взаимоиндуктивная связь. Кроме того, секции, коммутируемые различными щетками и находящиеся под соседними полюсами, также имеют сильную взаимоиндуктивную связь, если стороны этих секций расположены в общих пазах, вследствие чего в рассматриваемой коммутируемой секции индуцируется ЭДС *взаимной индукции*, которую можно определить по выражению:

$$e_m = \sum_n e_{mn} = - \sum_n M_n \frac{di_n}{dt}, \quad (2.14)$$

где M_n – взаимная индуктивность между рассматриваемой секцией и одновременно с ней коммутируемой секцией.

ЭДС e_m имеет такой же знак, как и ЭДС e_L и поэтому она тоже стремится замедлить коммутацию. Обычно эти ЭДС объединяют в общую, так называемую, *реактивную ЭДС*, равную:

$$e_r = e_L + e_m. \quad (2.15)$$

Кроме того, в коммутируемой секции индуцируется ЭДС от поля поперечной реакции якоря e_{aq} , которая имеет такое же направление, как и ток секции в начале коммутации. Следовательно, эта ЭДС стремится сохранить прежнее направление тока, является положительной и также замедляет коммутацию.

В общем случае в зоне коммутируемых секций может существовать магнитное поле, внешнее по отношению к якорю, т. е. создаваемое индуктором. При вращении сторон коммутируемой секции в этом поле в ней индуцируется ЭДС, которая может иметь тот или иной знак в зависимости от направления внешнего поля.

Возникает стремление добиться с помощью внешнего поля компенсации ЭДС e_r и e_{aq} в секции, так как уже в машинах мощностью порядка 0,5 кВт эти ЭДС сильно затрудняют коммутацию. На практике это обычно осуществляется с помощью добавочных полюсов, которые создают внешнее поле необходимой интенсивности и направления.

Поле реакции якоря и внешнее поле индуктора, действуя совместно, образуют в зоне коммутируемых секций результирующее, так называемое коммутирующее поле. Индуцируемая этим полем в коммутируемой секции ЭДС e_k называется *коммутирующей ЭДС* и определяется по формуле:

$$e_k = 2B_k w_c \ell_\delta v_a, \quad (2.16)$$

где B_k – индукция коммутирующего поля.

Коммутируемая секция пронизывается магнитным потоком главных полюсов Φ_δ и сцепляется с ним. Если стороны секции расположены в нейтральной зоне, то магнитный поток Φ_δ не индуцирует ЭДС вращения в этой секции. Однако если поток главных полюсов изменяется во времени, то в коммутируемой секции индуцируется ЭДС *трансформации (пульсации)*, равная:

$$e_{mp} = -w_c \frac{d\Phi_\delta}{dt}. \quad (2.17)$$

В МПТ эта ЭДС возникает только в особых условиях, например, в неуставившихся режимах.

Таким образом, в теории коммутации в основном рассматриваются две ЭДС – реактивная ЭДС секции e_r и коммутирующая ЭДС e_k . Для достижения наилучших условий коммутации необходимо, чтобы эти ЭДС имели различные направления и были равны по величине (прямолинейная коммутация) или чтобы e_k была несколько больше e_r (слегка ускоренная коммутация). Для этого коммутирующее поле должно иметь направление, противоположное направлению поля реакции якоря (рис. 2.12).

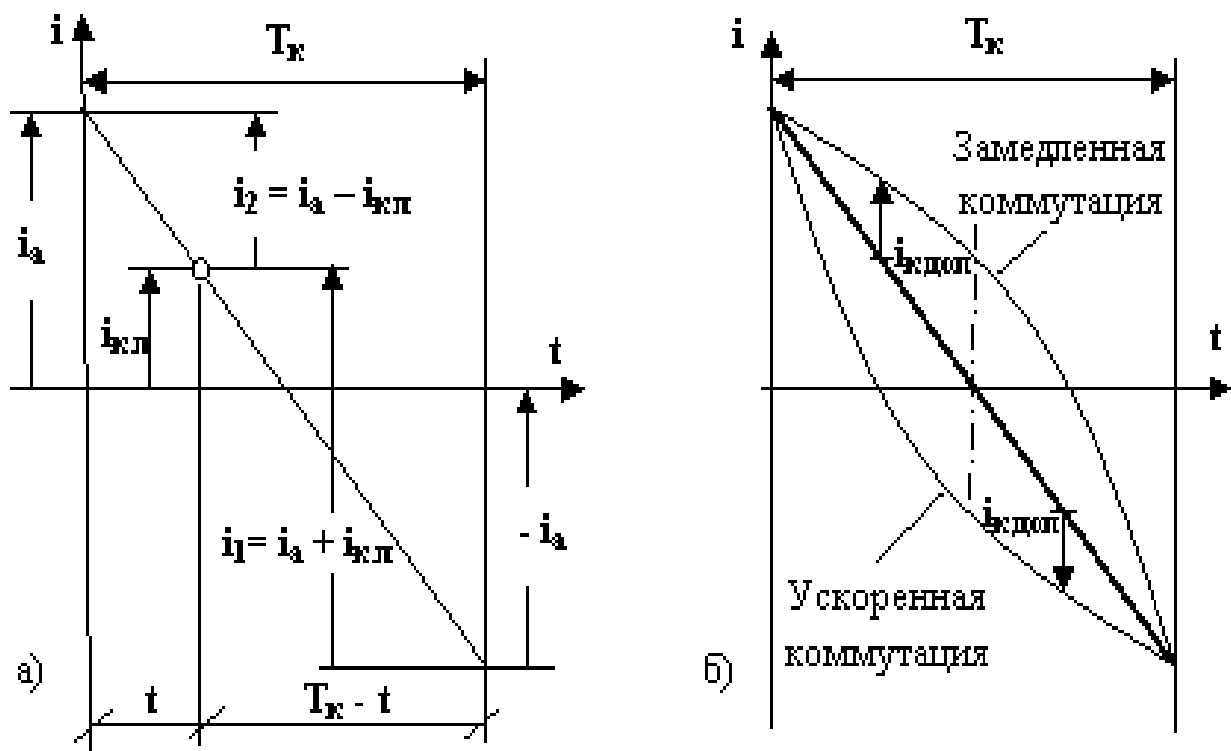


Рис. 2.12. Изменение тока при прямолинейной *а* и криволинейной *б* коммутации

2.5 Способы улучшения коммутации

Для создания хороших условий коммутации необходимо, прежде всего, обеспечить надлежащее состояние коллектора и щеточного аппарата, чтобы устранить механические причины искрения.

Способы улучшения коммутации направлены на уменьшение добавочного тока коммутации или тока короткого замыкания коммутируемой секции и сводятся к следующим мероприятиям:

- 1) снижению коммутирующей ЭДС с помощью добавочных полюсов или сдвига щеток с геометрической нейтрали;
- 2) увеличению сопротивления цепи коммутируемой секции;
- 3) уменьшению реактивной ЭДС.

Улучшение коммутации с помощью добавочных полюсов

Основным способом улучшения коммутации в современных машинах постоянного тока является создание коммутирующего магнитного поля с помощью добавочных полюсов.

Добавочные полюсы устанавливаются между главными полюсами (рис. 2.13) и крепятся болтами к ярму индуктора. МДС добавочных полюсов $F_{д.п}$ должна быть направлена против МДС реакции якоря $F_{ақ}$, чтобы скомпенсировать ее и создать сверх того коммутирующее поле B_k для компенсации реактивной ЭДС e_r . Следовательно, при отсутствии компенсационной обмотки $F_{д.п} \succ F_{ақ}$, а при наличии ее $F_{д.п} + F_{ко} \succ F_{ақ}$. В последнем случае требуемая величина $F_{д.п}$

меньше, так как основная доля реакции якоря компенсируется компенсационной обмоткой.

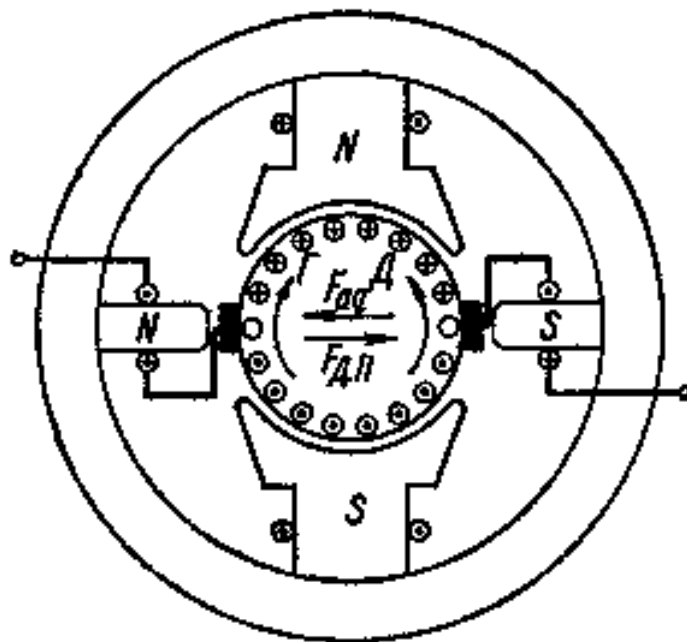


Рис. 2.13. Расположение и полярность добавочных полюсов

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать правило: за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря в режиме генератора должен следовать добавочный полюс противоположной полярности, а в режиме двигателя – добавочный полюс той же полярности.

Так как величины $F_{a\phi}$ и e_r пропорциональны току якоря, то для их компенсации $F_{a\pi}$ и B_k также должны быть пропорциональны току якоря. Для удовлетворения этого условия обмотку добавочных полюсов соединяют последовательно с якорем, а добавочные полюсы выполняют с ненасыщенной магнитной системой. Поэтому при номинальной нагрузке в них допускается индукция не больше 0,8–1,0 Тл. Так как на отдельных участках ярма индуктора магнитные поля главных и добавочных полюсов складываются, то во избежание насыщения этих участков индукция главного поля в ярме должна быть не больше 1,3 Тл. Сердечники добавочных полюсов изготавливаются массивными из стальнойковки или из листовой стали.

Добавочные полюсы применяются в машинах с $P_n \geq 0,3$ кВт. Обычно число добавочных полюсов берется равным числу главных, однако в машинах мощностью до 2–2,5 кВт иногда делают половинное число добавочных полюсов. Применение добавочных полюсов позволяет увеличить линейную нагрузку машины и тем самым уменьшить ее размеры и стоимость.

Улучшение коммутации путем сдвига щеток

В машинах мощностью до нескольких сотен ватт добавочных полюсов не ставят. Коммутирующее поле при этом можно создать путем сдвига щеток с геометрической нейтрали, благодаря чему в зоне коммутации начинает действовать

поле главных полюсов (рис. 2.14). Чтобы индуцируемая этим полем в коммутируемой секции ЭДС e_k имела правильное направление, поле главных полюсов в зоне коммутаций должно быть направлено против поля реакции якоря. Для этого в генераторе щетки необходимо повернуть в сторону вращения, а в двигателе – наоборот (рис. 2.14).

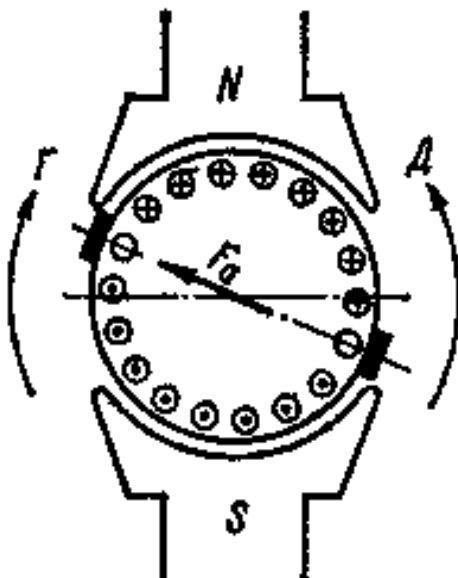


Рис. 2.14. Улучшение коммутации путем сдвига щеток с геометрической нейтрали

Если поток главных полюсов Φ_δ изменяется пропорционально току якоря (машины с последовательным возбуждением), то при определенном, фиксированном положении щеток можно достичь хороших условий коммутации в широком диапазоне изменения нагрузки. Если же $\Phi_\delta = const$, то наилучшие условия коммутации достигаются только при одной определенной нагрузке. Установку щеток производят на глаз, наблюдая за их искрением.

Увеличение сопротивления цепи коммутируемой секции

Увеличение сопротивления цепи коммутируемой секции возможно за счет выполнения «петушков» коллектора с повышенным сопротивлением. Однако это приводит к уменьшению коэффициента полезного действия (КПД) машины, а также к увеличению плотности тока у сбегающего края щетки. Кроме того, такие «петушки» ненадежны в работе.

Существенным является подбор щеток с надлежащими характеристиками. При тяжелых условиях коммутации лучше работают твердые графитные щетки с повышенным переходным сопротивлением переходного контакта. Однако при этом электрические потери в переходном контакте и механические потери на трение также больше. Щетки с круто поднимающейся вольт-амперной характеристикой благоприятны с точки зрения уменьшения плотности тока на сбегающем краю щетки и способствуют улучшению коммутации. Медно-графитные щетки, обладающие малым переходным сопротивлением, применяются только в машинах на напряжение до 25–30 В.

3 ГЕНЕРАТОРЫ И ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1 Генераторы постоянного тока

Назначение, область применения и классификация генераторов постоянного тока

Генераторы постоянного тока (ГПТ) являются источниками постоянного тока, в которых осуществляется преобразование механической энергии в электрическую. Якорь генератора приводится во вращение каким-либо первичным двигателем, в качестве которого могут быть использованы электрические двигатели, двигатели внутреннего сгорания и т. д.

Генераторы находят применение в тех отраслях промышленности, где по условиям производства необходим или является предпочтительным постоянный ток (металлургические и электролизные предприятия, транспорт и др.).

В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники для получения постоянного тока часто используют выпрямительные установки, но, несмотря на это, генераторы продолжают находить широкое применение.

Генераторы постоянного тока выпускаются на мощности от нескольких киловатт до 10 МВт.

Для каждой электрической машины заводом-изготовителем устанавливается предельно допустимый режим работы при определенных условиях ее эксплуатации. Величины, соответствующие этому режиму работы (мощность, ток, напряжение, частота вращения и др.), называются *номинальными данными* машины. Они указываются в каталогах и выбиваются на щитке, прикрепленном к корпусу машины.

Под номинальной мощностью в ГПТ понимается мощность, отдаваемая машиной в сеть, а под номинальным током – ток нагрузки, соответствующий этой мощности.

Классификация ГПТ

Классификация генераторов постоянного тока производится по способу их возбуждения. Они подразделяются на:

- 1) генераторы с независимым возбуждением;
- 2) генераторы с самовозбуждением.

Первый тип генераторов выполняется с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением.

В генераторах с электромагнитным возбуждением обмотка возбуждения, располагаемая на главных полюсах, подключается к независимому источнику питания (рис. 3.1, а). Ток цепи возбуждения I_g может изменяться в широких пределах с помощью резистора R_g . Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, невелика и в номинальном режиме составляет 1–5 % номинальной мощности, снимаемой с якоря генератора. Обычно процентное значение мощности возбуждения уменьшается с возрастанием номинальной мощности машины.

Магнитоэлектрические генераторы возбуждаются постоянными магнитами, из которых изготавливаются полюсы машины. С таким видом возбуждения

выполняются ГПТ относительно небольшой мощности. Недостатком генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением является трудность регулирования напряжения.

У генераторов с самовозбуждением обмотка возбуждения получает питание от собственного якоря. В зависимости от способа ее включения генераторы с самовозбуждением подразделяются на: *генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением* (рис. 3.1, б, в, г).

Схема соединения генератора параллельного возбуждения показана на рис. 3.1, б. Резистор R_δ дает возможность изменять ток возбуждения I_δ , а, следовательно, и выходное напряжение. Ток якоря I_a у такого генератора равен:

$$I_a = I + I_\delta, \quad (3.1)$$

где I – ток нагрузки.

Ток возбуждения относительно мал и для номинального режима составляет 1–5 % номинального тока машины.

У генератора последовательного возбуждения (рис. 3.1, в) обмотка возбуждения соединяется последовательно с якорем, и ее ток возбуждения равен току якоря:

$$I_a = I = I_\delta. \quad (3.2)$$

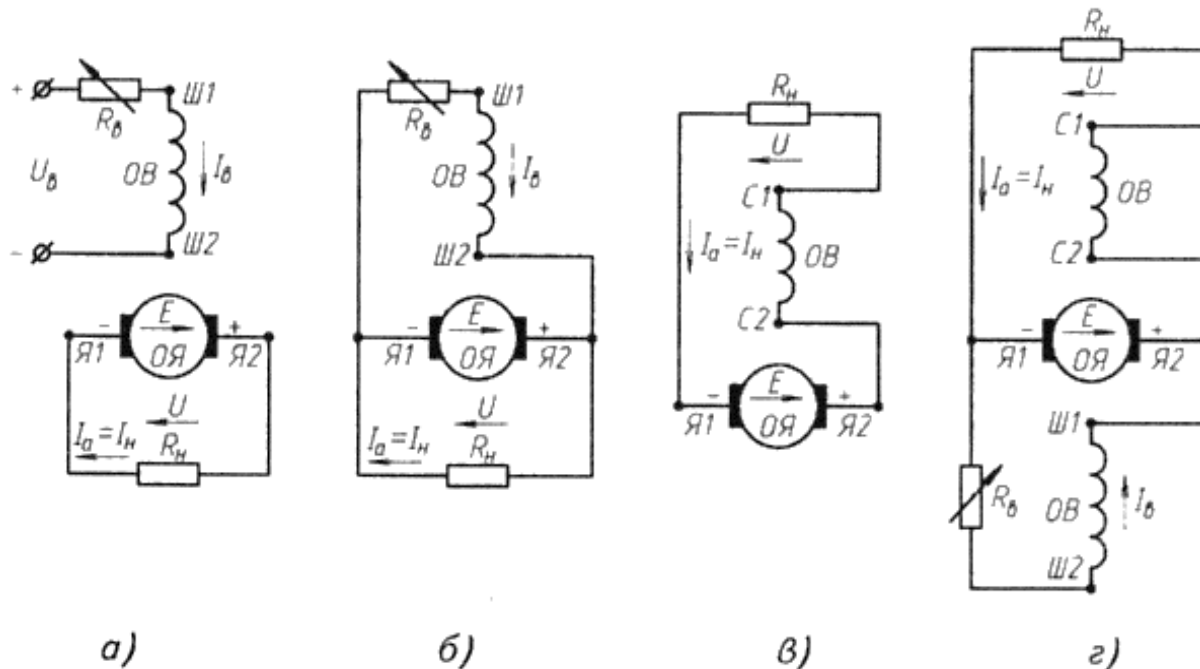


Рис. 3.1. Схемы ГПТ с независимым а, параллельным б, последовательным в и смешанным г возбуждением

У генераторов смешанного возбуждения (рис. 3.1, г) на полюсах размещаются две обмотки. Одна из них, имеющая большое число витков и выполненная из проводников относительно небольшого сечения, включается параллельно с

якорем, а другая обмотка с малым числом витков из проводников большого сечения включается последовательно с якорем. Ток якоря такого генератора равен:

$$I_a = I = I_g. \quad (3.3)$$

У этих генераторов параллельная и последовательная обмотки могут быть включены согласно (МДС этих обмоток направлены согласно) и встречно (их МДС направлены встречно). В зависимости от этого различаются *генераторы смешанного согласного включения и генераторы смешанного встречного включения*. Обычно в генераторах смешанного возбуждения основная часть МДС возбуждения создается параллельной обмоткой. Генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения иногда называют соответственно *генераторами шунтового, серийного и компаундного возбуждения*.

Согласно ГОСТ для МПТ принято следующее обозначение выводов обмоток: обмотки якоря Я1-Я2, независимой обмотки возбуждения Н1-Н2, параллельной обмотки возбуждения Ш1-Ш2, последовательной обмотки возбуждения С1-С2, обмотки дополнительных полюсов Д1-Д2, компенсационной обмотки К1-К2. Цифра 1 обозначает начало, а цифра 2 – конец обмотки.

3.2 Уравнения генераторов постоянного тока

Основные соотношения, характеризующие работу машины в качестве генератора, можно представить в виде приведенных ниже уравнений. Эти уравнения справедливы для всех генераторов независимо от способа их возбуждения.

Уравнение равновесия напряжения

Напряжение на выводах генератора всегда будет меньше наводимой в обмотке якоря ЭДС на значение падения напряжения в цепи якоря и в щеточном контакте:

$$U_a = E_a - I_a \sum r_a - \Delta U_{щ}, \quad (3.4)$$

где $I_a \sum r_a$ – падение напряжения в обмотках якоря;

$\Delta U_{щ}$ – падения напряжения в щеточном контакте.

Сопротивление $\sum r_a$ включает в себя сопротивления обмотки якоря и всех последовательно соединенных с ней обмоток. В общем случае:

$$\sum r_a = r_a + r_d + r_c + r_k + r_{щ}, \quad (3.5)$$

где $r_a, r_d, r_c, r_k, r_{щ}$ – сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов, последовательной серийной, компенсационной и щеточного контакта.

В зависимости от конкретной схемы генератора часть сопротивлений в $\sum r_a$ будет отсутствовать.

Для приближенных расчетов уравнение 3.4 можно упростить:

$$U_a = E_a - I_a R_a, \quad (3.6)$$

где R_a :

$$R_a = \sum r_a + r_{щ}, \quad (3.7)$$

где $r_{щ}$ переходное сопротивление щеточного контакта приближенно принимается постоянным и равным:

$$r_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{аном}}. \quad (3.8)$$

Ток якоря генератора обусловлен ЭДС якоря и всегда имеет с ней одинаковое направление:

$$I_a = \frac{(E_a - U_a)}{R_a}. \quad (3.9)$$

Уравнение баланса мощности

Уравнение баланса мощности можно получить, если правую и левую часть уравнения равновесия напряжения умножим на ток якоря:

$$U_a I_a = E_a I_a - I_a^2 \sum r_a - \Delta U_{щ} I_a. \quad (3.10)$$

Произведение $E_a I_a = P_{эм}$ называется *электромагнитной мощностью* и представляет собой *полную электрическую мощность*, которая получается в результате преобразования механической мощности. Часть этой мощности расходуется в цепи якоря на электрические потери в обмотках $I_a^2 \sum r_a = P_{э}$ и в переходном сопротивлении щеточного контакта $\Delta U_{щ} I_a = P_{э.щ}$. Остальная часть мощности, равная произведению $U_a I_a$, является отдаваемой мощностью генератора. В генераторах независимого возбуждения эта мощность поступает во внешнюю сеть и является полезной мощностью генератора:

$$P_2 = U_a I_a. \quad (3.11)$$

В генераторах параллельного и смешанного возбуждения полезная мощность, отдаваемая в сеть, будет меньше на значение мощности, затрачиваемой на возбуждение:

$$P_2 = U_a I_a - P_e = UI. \quad (3.12)$$

К генератору от двигателя, приводящего во вращение его якорь, подводится механическая мощность P_1 . Большая часть этой мощности преобразуется в электрическую, так называемую электромагнитную мощность, а другая ее часть расходуется в генераторе на покрытие механических потерь (трение в подшипниках, вентиляцию), магнитных потерь в якоре и добавочных потерь:

$$P_1 = P_{эм} + P_{мх} + P_{мг} + P_{доб}. \quad (3.13)$$

Рассмотренное преобразование мощности в ГПТ для наглядности можно представить в виде энергетической диаграммы, представленной на рис. 3.2. Эта диаграмма построена для генератора параллельного возбуждения.

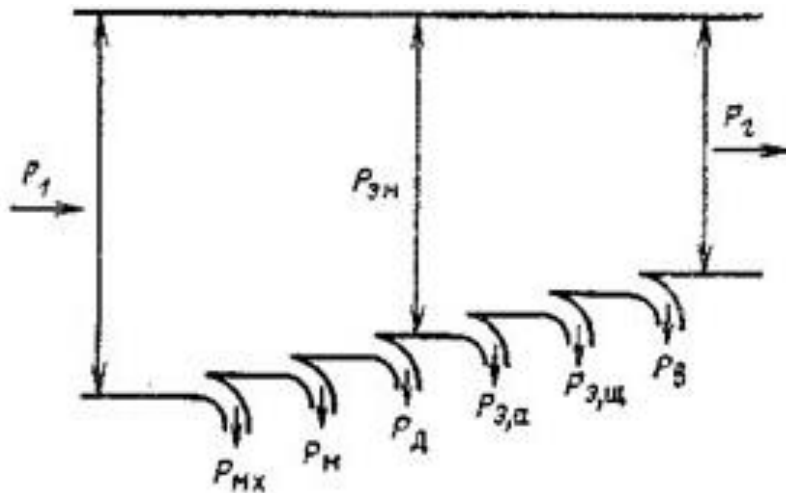


Рис. 3.2. Энергетическая диаграмма генератора параллельного возбуждения

Поделив правую и левую части выражения 3.13 на угловую скорость якоря ω , получим уравнение равновесия моментов:

$$M_1 = M_{эм} + M_0, \quad (3.14)$$

где M_0 — момент, обусловленный внутренними потерями в машине:

$$M_0 = \frac{P_{мх} + P_{мг} + P_{доб}}{\omega}; \quad (3.15)$$

$M_{эм}$ — электромагнитный момент, направленный в генераторе против вращения:

$$M_{эм} = c_m I_a \Phi_\delta. \quad (3.16)$$

При увеличении тока якоря этот момент возрастает, а, следовательно, и мощность, поступающая от приводного двигателя.

3.3 Характеристики генераторов постоянного тока

Рабочие свойства электрических машин определяются их характеристиками. Для генераторов постоянного тока основными характеристиками являются характеристики холостого хода, нагрузочная, внешняя, регулировочная. Указанные характеристики определяются при постоянной номинальной частоте вращения якоря ($n = n_n = \text{const}$). Они могут быть получены как экспериментальным, так и расчетным путем.

Характеристики генератора независимого возбуждения

На рис. 3.1, а представлена схема для экспериментального исследования генератора независимого возбуждения. Для возможности изменения в широких пределах тока I_B обмотка возбуждения подключается к независимому источнику через регулировочный резистор R_g . Ток в цепи якоря I_a регулируется резистором $R_{нг}$.

Пределы измерения амперметра и вольтметра в цепи якоря следует выбирать исходя из номинальных значений тока $I_{ном}$ и напряжения $U_{ном}$, которые указываются на щитке машины, прикрепленном к ее станине. Амперметр в цепи обмотки возбуждения выбирается на ток, равный 1–5 % $I_{ном}$. При снятии характеристик частота вращения поддерживается постоянной, равной номинальной.

Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС на выводах генератора E от тока возбуждения при разомкнутой цепи якоря (выключатель QS отключен, ток $I_a = 0$). В общем случае при изменении тока возбуждения сначала в одном направлении, а затем в другом эта зависимость, построенная в четырех квадрантах, имеет вид петли, показанной на рис. 3.3. Несовпадение кривых, полученных при увеличении и уменьшении тока возбуждения, объясняется наличием гистерезиса в стали, из которой выполнена магнитная система машины.

За расчетную принимается средняя кривая (на рис. 3.3 показана штриховой линией). При $I_g = 0$ в обмотке якоря наводится ЭДС $E_{ост}$. Эта ЭДС создается полем остаточного магнетизма статора и носит название ЭДС остаточного магнетизма. Она примерно равна 1–3 % номинального напряжения машины.

Для практических целей обычно ограничиваются снятием части петли, которую получают, уменьшая ток I_g от максимального значения до нуля (рис. 3.4). Продолжая полученную кривую I до пересечения с осью абсцисс в точке А, а затем передвигая ее параллельно самой себе вправо на отрезок ОА, получают характеристику холостого хода 2. При снятии характеристики следует обращать внимание на то, чтобы ток возбуждения изменялся в одном направлении (или только увеличивался, или уменьшался), так как в противоположном случае будет большой разброс точек из-за того, что они будут ложиться на разные гистерезисные кривые.

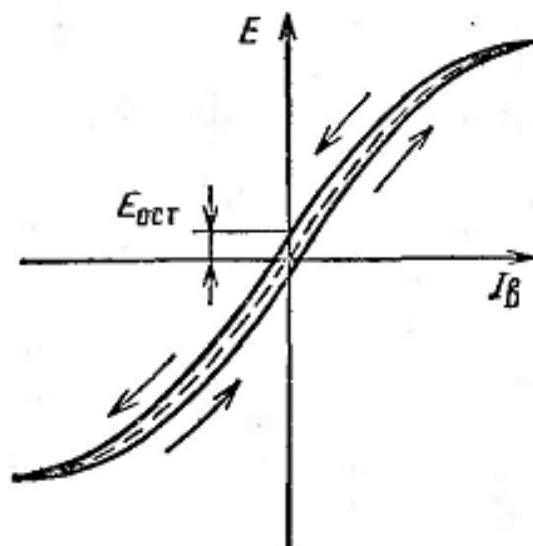


Рис. 3.3. Полная петля характеристики холостого хода генератора независимого возбуждения

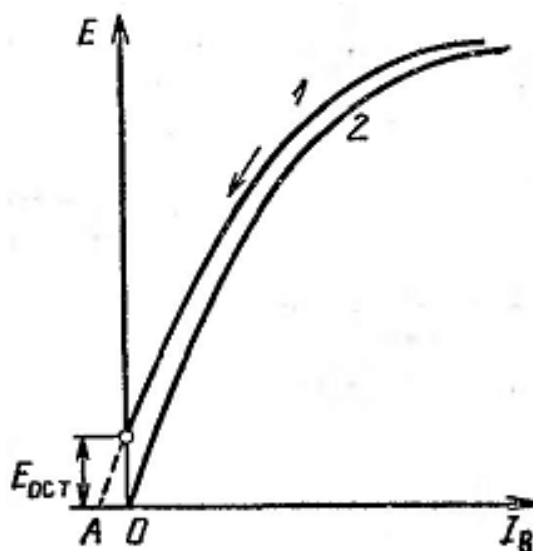


Рис. 3.4. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

В начальной части характеристики х. х. ЭДС изменяется пропорционально току возбуждения, а затем рост ЭДС замедляется, что объясняется насыщением стальных участков магнитной цепи.

Практическое значение характеристики холостого хода заключается в том, что по ней можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины. Кроме того, эта характеристика необходима для построения других характеристик машины.

Нагрузочная характеристика

Практическое значение нагрузочной характеристики состоит в том, что она позволяет количественно определить размагничивающее действие реакции якоря и исследовать зависимость ее от насыщения машины и тока якоря.

Эта характеристика представляет собой зависимость напряжения на выводах машины U от тока возбуждения I_e при условии, что ток в цепи якоря I_a поддерживается неизменным. Можно снять ряд характеристик для различных значений тока I_a . Если снимается одна нагрузочная характеристика, то чаще всего принимают, что $I_a = I_{ном} = const$. Ток возбуждения изменяют в сторону уменьшения, начиная от максимального его значения.

Для сопоставления и дальнейших построений нагрузочную характеристику 2 удобно построить на одном графике с нисходящей ветвью характеристики холостого хода 1 (рис. 3.5).

Характеристику холостого хода можно рассматривать как частный случай нагрузочной характеристики при $I_a = 0$.

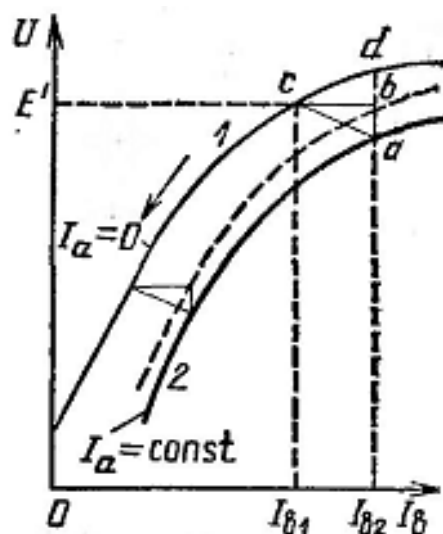


Рис. 3.5. Нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения

Нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода из-за падения напряжения в цепи якоря и размагничивающего действия реакции якоря, уменьшающей поток и ЭДС машины.

Внешняя характеристика

Эта характеристика является основной эксплуатационной характеристикой генератора. Она показывает, как изменяется напряжение U на выводах машины при возрастании тока нагрузки $I = I_a$, если при этом на цепь возбуждения не оказывается никакого воздействия. Для генератора независимого возбуждения внешнюю характеристику $U = f(I)$ получают при $I_e = const$. Исходной точкой этой характеристики является точка, когда при номинальном токе нагрузки $I = I_{ном}$ на выводах генератора установлено номинальное напряжение $U_{ном}$ (рис. 3.6). Напряжение устанавливают регулировкой тока возбуждения I_e , а ток нагрузки I — изменением сопротивления резистора $R_{нз}$ (см. рис. 3.1, а).

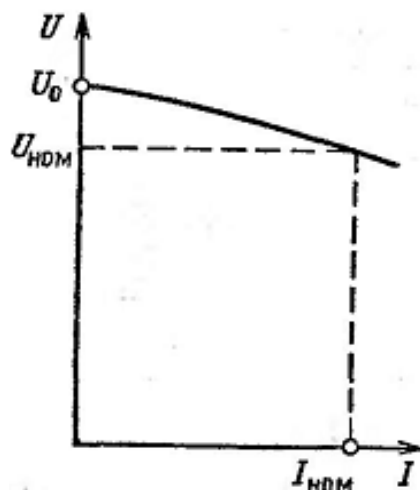


Рис. 3.6. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (рабочая область)

Ток возбуждения, соответствующий $U = U_{ном}$, при $I = I_{ном}$ называется номинальным током возбуждения $I_{в.ном}$. В процессе эксперимента этот ток поддерживается постоянным. Начиная от исходной точки ток I_a постепенно уменьшается до $I_a = 0$. Напряжение генератора при этом увеличивается, так как при уменьшении тока I_a уменьшаются падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря. При х. х. $U = U_0$ (рис. 3.6).

По внешней характеристике определяют номинальное изменение напряжения ΔU , выраженное в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100\% . \quad (3.17)$$

$\Delta U = 10 \div 15\%$ для генераторов независимого возбуждения. На рис. 3.7 показана внешняя характеристика генератора независимого возбуждения при изменении нагрузки от х. х. до к. з. Ток короткого замыкания I_k у таких генераторов равен $5-10 I_{ном}$.

Регулировочная характеристика

Как следует из рассмотрения внешних характеристик генератора независимого возбуждения, при $I_g = const$ напряжение на его выводах с изменением нагрузки не остается постоянным. Для того чтобы сохранить напряжение неизменным, необходимо регулировать ток возбуждения. Закон регулирования тока возбуждения для сохранения неизменным напряжения при изменении нагрузки дает регулировочная характеристика, представляющая собой зависимость $I_g = f(I)$ при $U = U_{ном} = const$. Регулировочная характеристика показана на рис. 3.8. Начинают снимать ее с холостого хода, когда $I = 0$. При увеличении тока нагрузки ток возбуждения I_g необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать уменьшение напряжения из-за падения напряжения и размагничивающего действия реакции якоря.

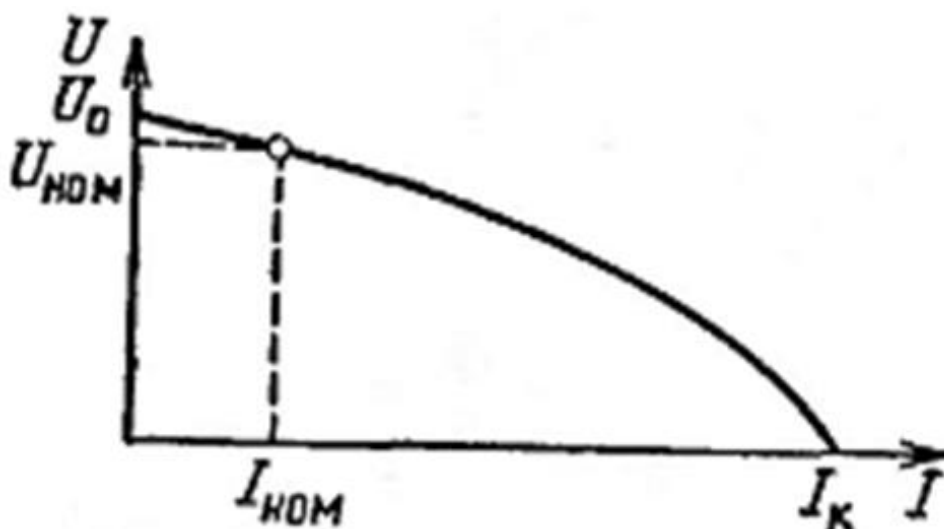


Рис. 3.7. Полная внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

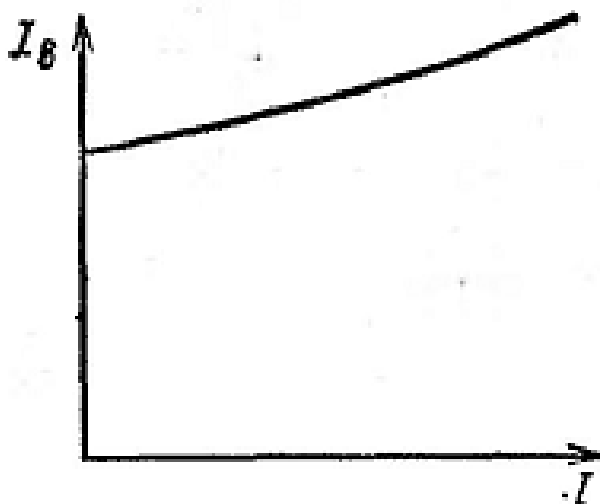


Рис. 3.8. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

Характеристики генератора параллельного возбуждения

Самовозбуждение генератора

У генератора параллельного возбуждения обмотка возбуждения питается от собственного якоря (рис. 3.1, б). Электродвижущая сила в якоре появляется в результате самовозбуждения машины, происходящего под действием остаточного магнетизма в полюсах и ярме статора. Для того чтобы в машине появился поток остаточного магнетизма, она хотя бы один раз должна быть намагничена путем пропускания тока через обмотку возбуждения от постороннего источника.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом. При вращении якоря от потока остаточного магнетизма в его обмотке наводится ЭДС. Эта ЭДС – ЭДС остаточного магнетизма $E_{ост}$ – невелика и составляет 1–3 % номинального напряжения машины. Так как обмотка возбуждения подключена к якору, то ЭДС $E_{ост}$ создает в ней небольшой ток. Этот ток, протекая по обмотке возбуждения, уве-

личивает поток полюсов, который в свою очередь увеличивает ЭДС в якоре. Увеличение ЭДС вызовет повышение тока в обмотке возбуждения, который еще сильнее увеличит поток полюсов и ЭДС, наводимую в якоре, что вызовет дальнейшее возрастание тока возбуждения, и т. д.

Процесс нарастания тока в обмотке возбуждения при х. х. машины ($I = 0$) может быть описан дифференциальным уравнением:

$$E = I_{\epsilon} \sum R_{\epsilon} + \frac{d(L_{\epsilon} I_{\epsilon})}{dt}, \quad (3.18)$$

где L_{ϵ} – индуктивность обмотки возбуждения;

$\sum R_{\epsilon}$ – сопротивления цепи этой обмотки, включая сопротивление регулирующего резистора.

Падение напряжения в цепи якоря от тока I_{ϵ} ничтожно, поэтому в формуле 3.18 напряжение на зажимах обмотки возбуждения принято равным ЭДС E .

Процесс самовозбуждения завершается, когда ток в обмотке возбуждения достигает установившегося значения. Тогда $\frac{d(L_{\epsilon} I_{\epsilon})}{dt} = 0$ и ЭДС будет равна:

$$E = I_{\epsilon} \sum R_{\epsilon}. \quad (3.19)$$

На рис. 3.9 показаны зависимости $E = f(I_{\epsilon})$ и $I_{\epsilon} \sum R_{\epsilon} = f(I_{\epsilon})$. Первая зависимость является *характеристикой холостого хода* (кривая 1), а вторая – *характеристикой цепи возбуждения*.

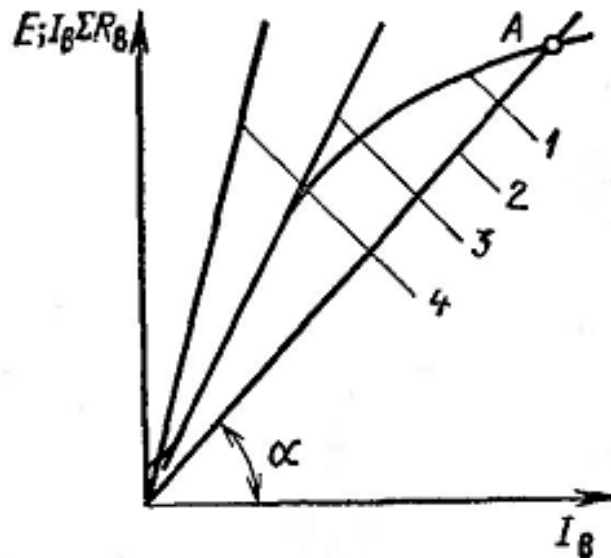


Рис. 3.9. Самовозбуждение генератора с параллельным возбуждением при $n = const$

Если принять, что $\sum R_{\epsilon} = const$, то характеристика цепи возбуждения

представляет собой прямую 2, идущую под углом α к оси абсцисс, причем $\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_{\epsilon} R_{\epsilon}}{I_{\epsilon}} = \sum R_{\epsilon}$. Точка пересечения характеристик в точке А соответствует равенству 3.19, а ЭДС E в этой точке является той ЭДС, которая установится при данном сопротивлении $\sum R_{\epsilon}$ на выводах машины. При изменении $\sum R_{\epsilon}$ будет изменяться ЭДС E . Если увеличить сопротивление $\sum R_{\epsilon}$, то угол наклона характеристики цепи возбуждения α возрастет, и точка А переместится влево. При некотором сопротивлении цепи возбуждения R_{κ} , называемом *критическим сопротивлением*, прямая $I_{\epsilon} R_{\kappa}$ совпадает с прямолинейной частью характеристики холостого хода (прямая 3). Критическое сопротивление является максимальным сопротивлением цепи обмотки возбуждения, при котором еще возможно самовозбуждение машины. При дальнейшем увеличении сопротивления $\sum R_{\epsilon}$ самовозбуждения происходить не будет, так как прямая $I_{\epsilon} \sum R_{\epsilon} = f(I_{\epsilon})$ (прямая 4) не пересекает характеристику холостого хода.

Самовозбуждение генератора происходит в том случае, если ток I_{ϵ} , протекающий по обмотке возбуждения, создает поток, направленный согласно с потоком остаточного магнетизма. При неправильном включении обмотки возбуждения эти потоки будут направлены встречно и самовозбуждение происходить не будет. Тогда для изменения направления тока I_{ϵ} в обмотке возбуждения следует переключить концы, подсоединяющие ее к якору. Таким образом, для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы был остаточный магнитный поток, чтобы сопротивление цепи обмотки возбуждения было меньше критического, и чтобы обмотка возбуждения была правильно подсоединена к якору.

Характеристики холостого хода и нагрузочная

В отличие от генератора независимого возбуждения у рассматриваемого генератора ток якоря I_a не равен току нагрузки I . При отключенной нагрузке ($I = 0$) ток якоря не равен нулю, а будет равен I_{ϵ} .

Характеристики холостого хода и нагрузочная могут быть получены так же, как и у генератора независимого возбуждения, и имеют тот же характер. Ток I_{ϵ} при снятии этих характеристик уменьшается с помощью резистора R_{ϵ} от максимального до минимально возможного значения, ЭДС остаточного магнетизма определяется при отключенной обмотке возбуждения.

Из-за небольшого значения тока возбуждения I_{ϵ} падение напряжения, вызываемое им в цепи якоря, мало и не оказывает существенного влияния на напряжение машины при нагрузке. При х. х. можно принимать, что напряжение на выводах практически равно ЭДС якоря.

Внешняя характеристика

Внешнюю характеристику $U = f(I)$ снимают при условии, что $\sum R_{\epsilon} = \text{const}$. С помощью резистора R_{ϵ} сопротивление $\sum R_{\epsilon}$ устанавливается таким, чтобы при номинальном токе нагрузки $I_{\text{ном}}$ напряжение на выводах машины

было номинальным. Ток нагрузки устанавливается резистором $R_{нз}$. Затем, изменяя ток I , получают другие точки внешней характеристики (рис. 3.10).

Как следует из рис. 3.10, с увеличением тока I напряжение U уменьшается. Понижение напряжения U на выводах генератора параллельного возбуждения с ростом тока I будет происходить сильнее, чем на выводах генератора независимого возбуждения, работающего при $I_e = const$. У генератора с параллельным возбуждением напряжение понижается не только из-за размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения I_e . Уменьшение тока возбуждения

$I_e = \frac{U}{\sum R_e}$ при $\sum R_e = const$ вызвано понижением напряжения U на выводах машины, к которым подсоединена цепь обмотки возбуждения.

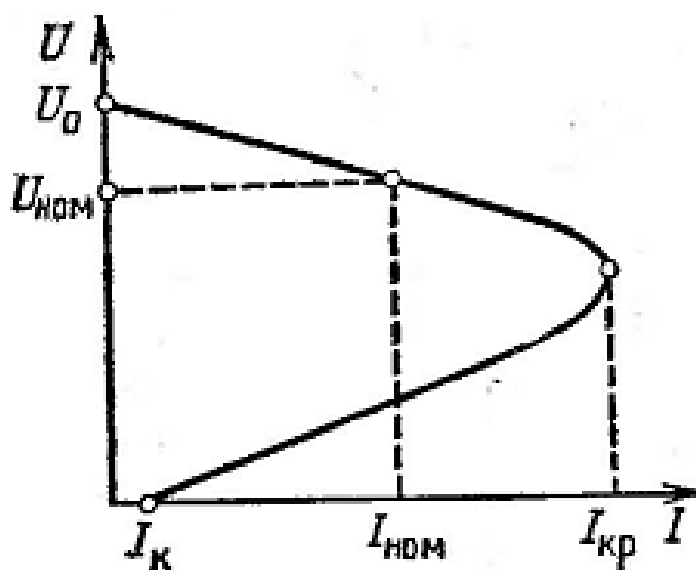


Рис. 3.10. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

У генератора параллельного возбуждения при уменьшении сопротивления нагрузки ток I будет увеличиваться до определенного значения, называемого критическим током $I_{кр}$ (рис. 3.10): $I_{кр} = 1,5 \div 2,5 I_{ном}$. При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки ток I начинает падать. Такой характер внешней характеристики объясняется тем, что генератор параллельного возбуждения сам себя размагничивает, так как уменьшается ток возбуждения. Вначале этот процесс протекает медленно, так как сталь машины насыщена и уменьшение тока возбуждения не вызывает сильного снижения потока и ЭДС машины. Затем, когда ток возбуждения будет соответствовать линейной (ненасыщенной) части характеристики холостого хода, размагничивание будет происходить более интенсивно, так как уменьшение тока I_e будет вызывать большие изменения потока и ЭДС. При к. з. машина практически будет размагничена и установившийся ток короткого замыкания I_k определяется только ЭДС остаточного магнетизма.

Вследствие малости этой ЭДС ток I_k в большинстве случаев невелик и не превышает номинального значения. Однако несмотря на это, в переходном режиме при внезапном к. з. вследствие медленного спада потока и ЭДС мгновенный ток короткого замыкания может превысить номинальное значение в несколько раз, что вызовет сильное искрение щеток, а в некоторых случаях и появление кругового огня. Поэтому эти генераторы, как и все другие генераторы, должны быть снабжены предохранителями или быстродействующими выключателями, отключающими короткозамкнутую цепь еще до того, как ток якоря достигнет больших значений. Номинальное изменение напряжения генераторов параллельного возбуждения составляет 15–20 %.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения $I_g = f(I)$ при $U = const$ имеет тот же характер, что и для генератора независимого возбуждения. Для одного и того же генератора регулировочные характеристики, полученные при независимом питании обмотки возбуждения и при ее параллельном включении, будут совпадать.

Характеристики генератора последовательного возбуждения

У генераторов последовательного возбуждения ток возбуждения I_g равен току якоря I_a (рис. 3.1, в). Поэтому при холостом ходе, когда $I_g = I_a = I = 0$, ЭДС, наводимая в обмотке якоря, равна $E_{ост}$.

Характеристики холостого хода и нагрузочная для такого генератора могут быть сняты при питании обмотки от независимого источника. Эти характеристики имеют тот же вид, что и для генератора независимого возбуждения.

Самовозбуждение генератора происходит, если сопротивление нагрузки будет меньше критического. Внешняя характеристика генератора показана на рис. 3.11 (кривая 2). На этом же рисунке изображена характеристика х. х. $E = f(I)$ (кривая 1). При одном и том же токе I напряжение генератора будет меньше, чем ЭДС по характеристике холостого тока, из-за падения напряжения в цепи якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

При малых нагрузках, когда ток якоря, а следовательно, и ток возбуждения I_g малы, машина не насыщена и ее ЭДС изменяется пропорционально току I . Падение напряжения и размагничивающее действие реакции якоря практически также изменяются пропорционально току. Поэтому, как это видно из внешней характеристики (рис. 3.11), напряжение на выводах машины растет пропорционально току I . При больших токах происходит насыщение магнитной системы машины, вследствие чего ЭДС при увеличении I будет изменяться мало, поэтому и напряжение с ростом тока увеличивается незначительно, а при очень больших токах из-за возрастания падения напряжения и размагничивающего действия реакции якоря напряжение начинает уменьшаться.

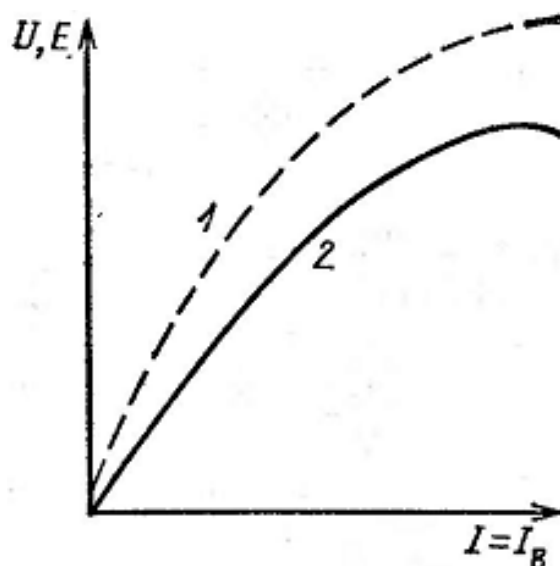


Рис. 3.11. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

Из-за сильной зависимости напряжения от тока нагрузки генераторы последовательного возбуждения широкого практического применения не нашли.

Характеристики генератора смешанного возбуждения

Схема генератора смешанного возбуждения показана на рис. 3.1, з. Параллельная обмотка возбуждения ОВШ может быть подключена к цепи якоря до последовательной обмотки ОВС или после нее (проводник обмотки ОВШ переносится из точки Д2 в точку С2). Характеристики генератора при той и другой схеме будут практически одинаковыми, так как последовательная обмотка имеет небольшое сопротивление и падение напряжения в ней будет мало. Увеличение МДС последовательной обмотки из-за протекания по ней тока I_g также ничтожно из-за малого количества ее витков и относительно небольшого тока.

Самовозбуждение генератора протекает так же, как и у генератора параллельного возбуждения. Ток якоря $I_a = I + I_g$.

Наибольшее практическое применение находят генераторы с согласным включением обмоток возбуждения. Наибольшую долю МДС возбуждения создает параллельная обмотка ОВШ. Последовательная обмотка рассчитывается так, чтобы ее МДС несколько превышала МДС размагничивающей составляющей реакции якоря. В этом случае последовательная обмотка не только компенсирует размагничивающую составляющую реакции якоря, но и создаст избыточную МДС, которая будет увеличивать поток возбуждения и ЭДС якоря при увеличении тока нагрузки. В результате подмагничивающего действия последовательной обмотки напряжение генератора с ростом тока I будет возрастать, как это видно по *внешней характеристике* $U = f(I)$ при $\sum R_g = const$, изображенной на рис. 3.12. Уровень повышения напряжения генератора с ростом тока I зависит от числа витков последовательной обмотки. Обмотку можно рассчитать так, чтобы напряжение увеличивалось на значение, необходимое для компенсации падения напряжения в проводах, идущих от генератора к потребителю. То-

гда у потребителя при любых нагрузках напряжение автоматически будет поддерживаться примерно постоянным.

При слабой последовательной обмотке внешняя характеристика имеет падающий характер. Отметим, что эффективность действия последовательной обмотки зависит от насыщения магнитной цепи машины. МДС последовательной обмотки при сильном насыщении будет давать небольшое увеличение магнитного потока и ЭДС, поэтому даже при достаточно сильной обмотке или при больших нагрузках напряжение на выводах машины будет уменьшаться с ростом тока I .

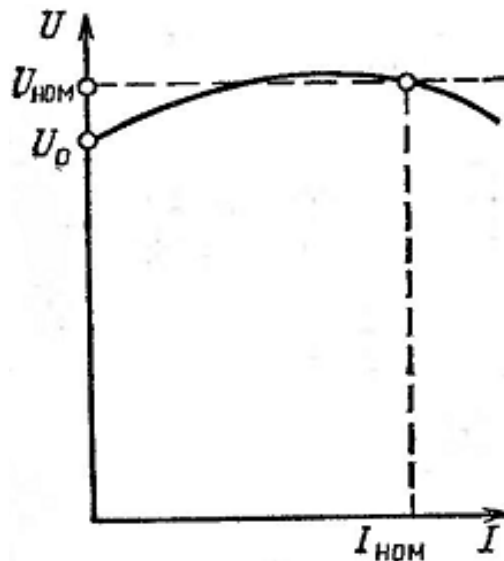


Рис. 3.12. Внешняя характеристика генератора смешанного согласного включения

Характеристика холостого хода

Характеристику холостого хода генератора смешанного возбуждения снимают так же, как и генератора параллельного возбуждения, и она имеет такой же характер. Так же, как и для генератора параллельного возбуждения, для генератора смешанного возбуждения снимают нагрузочную характеристику $U = f(I)$ при $I = \text{const}$.

В зависимости от соотношения МДС последовательной обмотки возбуждения F_c и размагничивающей составляющей реакции якоря F_{qd} нагрузочная характеристика может располагаться или выше, или ниже характеристики х. х. При достаточно сильной последовательной обмотке нагрузочная характеристика 2 идет выше характеристики х. х. 1 (рис. 3.13).

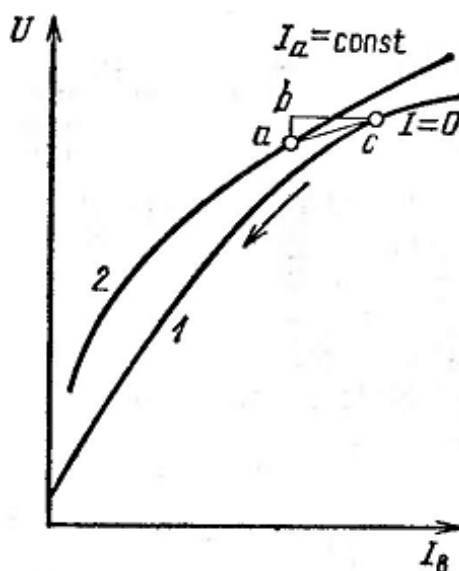


Рис. 3.13. Нагрузочная характеристика генератора смешанного согласного включения

Если по этим характеристикам построить характеристический треугольник, то его горизонтальный катет будет пропорционален результирующей намагничивающей МДС, созданной током якоря по оси Обмотки возбуждения. Длина этого катета в масштабе тока возбуждения равна $\frac{(F_c - F_{qd})}{W_e}$. Полученный таким образом треугольник используют для построения характеристик.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика $I_e = f(I)$ при $U = const$ у генератора смешанного возбуждения зависит от вида внешней характеристики. При достаточно сильной последовательной обмотке возбуждения, когда напряжение генератора возрастает с ростом тока нагрузки, регулировочная характеристика имеет вид, показанный на рис. 3.14.

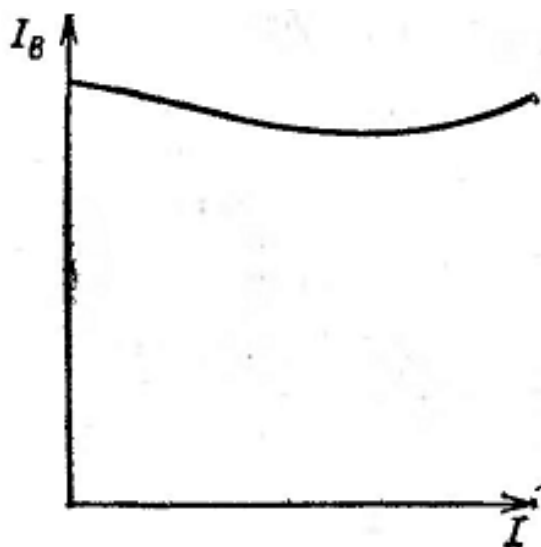


Рис. 3.14. Регулировочная характеристика генератора смешанного возбуждения при согласном включении ОВ

Внешняя характеристика

Генераторы смешанного возбуждения при встречном включении обмоток применяются относительно редко. У этих генераторов последовательная обмотка будет создавать МДС, направленную так же, как и МДС размагничивающей составляющей реакции якоря. Под их совместным размагничивающим действием результирующий поток возбуждения машины с ростом тока нагрузки будет уменьшаться. В результате этого внешняя характеристика такого генератора будет иметь резко падающий характер (рис. 3.15). Регулировочная характеристика этого генератора показана на рис. 3.16.

3.4 Двигатели постоянного тока

Благодаря своим хорошим регулировочным свойствам двигатели постоянного тока (ДПТ) нашли широкое распространение в промышленности. В тех случаях, когда по условиям работы установки требуется широкое изменение частоты вращения, применение для них двигателей постоянного тока во многих случаях является более предпочтительным, чем двигателей переменного тока. Они используются в металлургической промышленности, станкостроении, для создания систем автоматического регулирования и т. д. Широкое применение двигатели постоянного тока находят в авиации, автомобилестроении, на судах, транспорте, в том числе и на железнодорожном. Мощности, на которые выпускаются эти двигатели, лежат в пределах от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт. За номинальную мощность двигателя принимается механическая мощность на валу P_2 . Эта мощность обычно указывается на щитке, закрепленном на корпусе машины. Кроме мощности там указываются и другие соответствующие ей номинальные величины: напряжение U , ток I , частота вращения n .

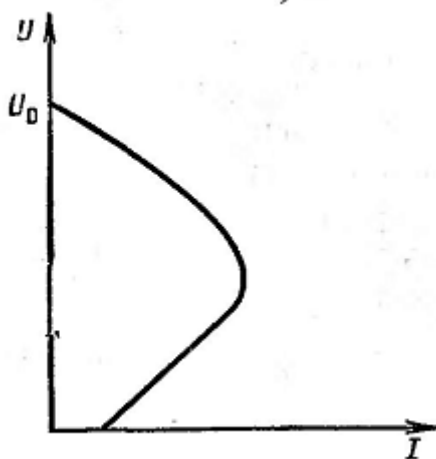


Рис. 3.15 Внешняя характеристика при смешанном возбуждении при встречном включении ОВ

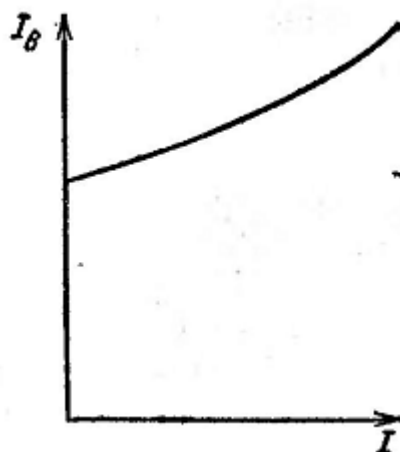


Рис. 3.16. Регулировочная характеристика генератора смешанного возбуждения при встречном включении ОВ

ДПТ, так же, как и генераторы, классифицируются по способу включения обмотки возбуждения: независимого возбуждения, параллельного (шунтового) возбуждения, последовательного (сериесного) возбуждения и смешанного (компаундного) возбуждения.

Принципиальные схемы этих двигателей имеют такой же вид, как и у соответствующих генераторов (рис. 3.17). Ток якоря I_a в двигателях независимого и последовательного возбуждения равен току I , потребляемому двигателем из сети, а в двигателях параллельного и смешанного возбуждения $I_a = I - I_b$. Мощность, затрачиваемая на возбуждение, составляет 1–5 % номинальной мощности двигателя. Меньшее значение относится к более мощным двигателям.

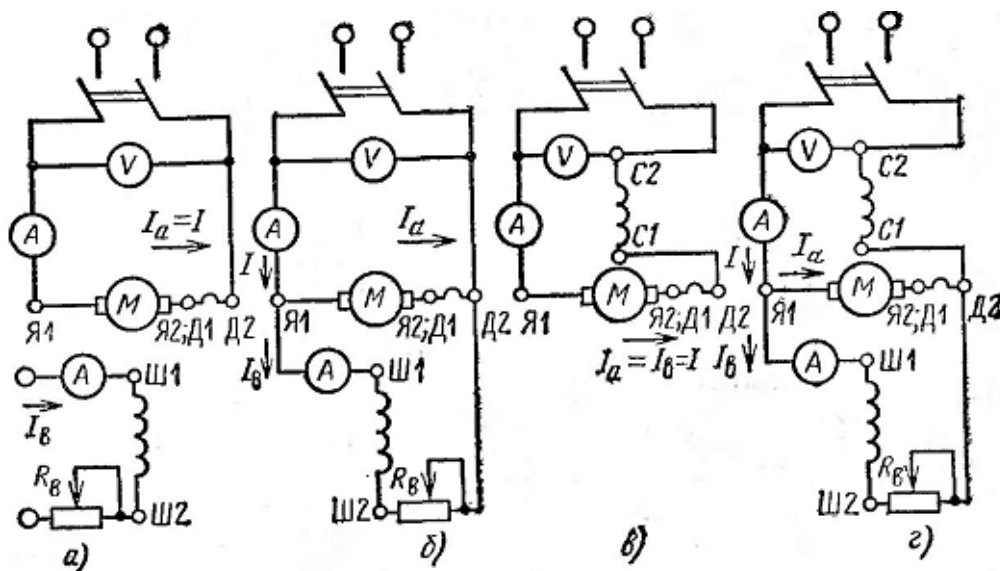


Рис. 3.17. Схемы двигателей постоянного тока с независимым а, параллельным б, последовательным в и смешанным г возбуждением

Практическое применение находят двигатели всех указанных выше систем возбуждения.

3.5 Уравнения двигателей постоянного тока

Уравнение равновесия напряжения

Напряжение на выводах двигателя всегда будет больше наводимой в обмотке якоря ЭДС на значение падения напряжения в цепи якоря и в щеточном контакте:

$$U_a = E_a + I_a \sum r_a + \Delta U_{щ}, \quad (3.20)$$

где $I_a \sum r_a$ – падение напряжения в обмотках;

$\Delta U_{щ}$ – падения напряжения в щеточном контакте.

Сопротивление $\sum r_a$ включает в себя сопротивления обмотки якоря и всех последовательно соединенных с ней обмоток. В общем случае:

$$\sum r_a = r_a + r_\delta + r_c + r_\kappa + r_{щ}, \quad (3.21)$$

где $r_a, r_\delta, r_c, r_\kappa, r_{щ}$ – сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов, последовательной (серийной), компенсационной и щеточного контакта.

В зависимости от конкретной схемы двигателя часть сопротивлений в $\sum r_a$ будет отсутствовать.

Для приближенных расчетов уравнение 3.20 можно упростить:

$$U_a = E_a + I_a R_a, \quad (3.22)$$

где R_a :

$$R_a = \sum r_a + r_{щ}, \quad (3.23)$$

где $r_{щ}$ переходное сопротивление щеточного контакта приближенно принимается постоянным и равным:

$$r_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{аном}}. \quad (3.24)$$

Падение напряжения в цепи якоря $I_a R_a$ относительно мало. При $I_a = I_{аном}$ оно составляет 2–5 % номинального напряжения.

Характерным условием работы машины в двигательном режиме является неравенство $U > E$. В связи с этим ток в якоре двигателя имеет направление, совпадающее с направлением приложенного напряжения и встречное с ЭДС:

$$I_a = \frac{(U_a - E_a)}{R_a}. \quad (3.25)$$

Уравнение баланса мощности

Уравнение баланса мощности можно получить, если правую и левую часть уравнения равновесия напряжения (3.20) умножим на ток якоря:

$$U_a I_a = E_a I_a + I_a^2 \sum r_a + \Delta U_{щ} I_a. \quad (3.26)$$

Произведение $U_a I_a$ является мощностью, подводимой из сети к цепи якоря. Часть этой мощности будет расходоваться на потери в обмотках в цепи якоря на электрические потери в обмотках $I_a^2 \sum r_a = P_{эм}$ и в переходном сопротивлении щеточного контакта $\Delta U_{щ} I_a = P_{э.щ}$. Остальная часть мощности, равная произведению $E_a I_a$, называется электромагнитной мощностью, которая численно равна полной механической мощности двигателя. Часть механической мощности пойдет на потери внутри двигателя: механические $P_{мх}$, магнитные $P_{мг}$ и добавочные $P_{доб}$. Остальная ее часть с вала машины передается сочлененному с двигателем механизму. Эта часть мощности P_2 называется полезной мощностью или мощностью на валу:

$$P_2 = P_{эм} - P_{мх} - P_{мг} - P_{доб}. \quad (3.27)$$

Полная мощность, забираемая из сети для двигателей независимого и последовательного возбуждения, равна $P_1 = U_a I_a$, а для двигателей параллельного и смешанного возбуждения будет больше на значение мощности $P_{\epsilon} = U_a I_{\epsilon}$, потребляемой параллельной обмоткой возбуждения машины:

$$P_1 = U_a (I_a + I_{\epsilon}) = U_a I. \quad (3.28)$$

Рассмотренное преобразование мощности в двигателе можно наглядно представить в виде энергетической диаграммы (рис. 3.18).

Уравнения равновесия моментов

Поделив формулу 3.27 на угловую скорость якоря $\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$ и проделав некоторые перестановки, получим:

$$M_{эм} = M_2 + M_0 = M_c, \quad (3.29)$$

где M_c – момент статического сопротивления;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент, создаваемый двигателем.

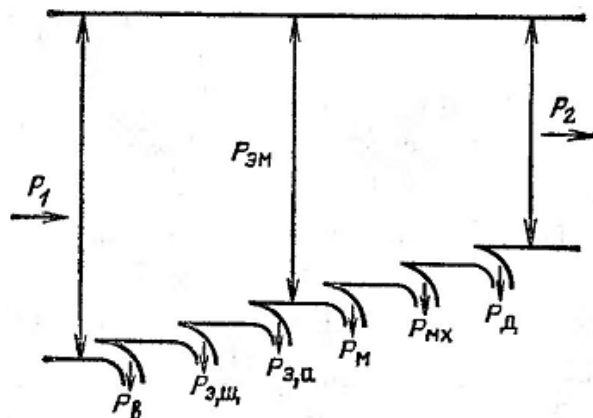


Рис. 3.18. Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения

Этот момент направлен в сторону вращения якоря и создается в результате взаимодействия тока, протекающего по проводникам обмотки якоря, с магнитным потоком:

$$M_{эм} = c_m I_a \Phi_\delta. \quad (3.30)$$

Электромагнитный момент уравнивает тормозной нагрузочный момент на валу машины, создаваемый сочлененным с ней исполнительным механизмом:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}, \quad (3.31)$$

а также тормозной момент, обусловленный потерями внутри машины:

$$M_0 = \frac{(P_{мх} + P_{мг} + P_{доб})}{\omega}. \quad (3.32)$$

Момент M_0 относительно мал, и в некоторых практических случаях можно приближенно принять $M \approx M_2 \approx M_c$.

Равенство 3.29 справедливо при постоянной скорости якоря. При всяких изменениях скорости возникает составляющая момента, идущая на разгон или торможение вращающихся масс двигателя и исполнительного механизма. Эта составляющая, равная $\frac{J d\omega}{dt} = M_J$, называется *динамическим моментом*.

Обычно принимают, что масса вращающихся частей m является постоянной, и тогда момент инерции равен:

$$J = m\rho^2, \quad (3.33)$$

где ρ – радиус инерции.

С учетом динамической составляющей уравнение моментов можно представить в виде:

$$M = M_2 + M_0 + M_J, \quad (3.34)$$

откуда следует, что:

1) при $M \succ (M_2 + M_0)$ $M_J \succ 0$ и $\frac{d\omega}{dt} \approx \frac{\Delta\omega}{\Delta t} > 0$. Здесь положительному приращению времени Δt будет соответствовать положительное приращение скорости $\Delta\omega$, т. е. в этом случае будет происходить разгон двигателя и сочлененного с ним производственного механизма;

2) при $M \prec (M_2 + M_0)$ $M_J \prec 0$ и $\frac{d\omega}{dt} \approx \frac{\Delta\omega}{\Delta t} < 0$. Здесь положительному приращению времени Δt соответствует отрицательное приращение скорости $\Delta\omega$, т. е. в этом случае будет происходить торможение двигателя и сочлененного с ним производственного механизма;

3) при $M = (M_2 + M_0)$ $M_J = 0$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$, т. е. скорость будет иметь установившееся постоянное значение.

Уравнение угловой скорости

Из формулы 3.22 можно получить выражение:

$$U_a - I_a R_a = E_a = c_e \omega \Phi_\delta. \quad (3.35)$$

Откуда следует, что наводимая в обмотке якоря ЭДС E_a зависит от подводимого напряжения U_a и падения напряжения $I_a R_a$. При увеличении или уменьшении U_a и $I_a R_a$ соответственно должна изменяться и ЭДС E_a . При $\Phi_\delta = const$ это может произойти за счет изменения скорости ω .

В свою очередь изменение потока двигателя Φ_δ при прочих равных условиях также вызовет изменение ω .

Таким образом, в двигателях постоянного тока всякое изменение скорости вызывается необходимостью сохранения электрического равновесия в цепи якоря. Математическую зависимость угловой скорости от указанных величин можно получить из формулы 3.35 в виде:

$$\omega = \frac{(U_a - I_a R_a)}{c_e \Phi_\delta}. \quad (3.36)$$

3.6 Характеристики двигателей постоянного тока

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

1) *скоростная характеристика* (электромеханическая) $\omega = f(I_a)$ – зависимость угловой скорости якоря от тока якоря;

2) *моментная характеристика* $M_{эм} = f(I_a)$ – зависимость электромагнитного момента от тока якоря;

3) *механическая характеристика* $\omega = f(M_{эм})$ – зависимость угловой скорости якоря от электромагнитного момента.

Скоростные и механические характеристики снимают при постоянном напряжении, подводимом к якорю, а для двигателей независимого, параллельного и смешанного возбуждения, кроме того, и при постоянном значении тока возбуждения I_e .

Характеристики двигателя последовательного возбуждения

Так как на железнодорожном транспорте в качестве тяговых электродвигателей для привода колесных пар используется более 95 % двигателей постоянного или пульсирующего тока последовательного возбуждения, то, рассмотрим основные характеристики именно этих ДПТ.

На рис. 3.17, в дана схема двигателя последовательного возбуждения. Характеристики снимают так же, как и у двигателя параллельного возбуждения. Характерной особенностью двигателя является то, что его ток якоря равен току возбуждения: $I_a = I_e = I$.

Скоростная характеристика $\omega = f(I_a)$ при $U = U_{ном} = const$. Для двигателя последовательного возбуждения уравнение скоростной характеристики имеет тот же вид, что и для двигателя независимого возбуждения. Магнитный поток $\Phi = f(I_a)$ у этого двигателя является функцией тока якоря $I_a = I_e$. Зависимость $\Phi_\delta = f(I_a)$, приведенная на рис. 3.19, носит название *магнитной характеристики* (принимая $\Delta\Phi_\delta = 0$).

Если для упрощения анализа принять, пренебрегая насыщением магнитной цепи машины, линейную зависимость между магнитным потоком и током якоря (штриховая прямая на рис. 3.19), т. е. считать:

$$\Phi_\delta = k_\phi I_a, \quad (3.37)$$

то формулу 3.36 можно записать в виде:

$$\omega = \frac{U_{ном} - I_a R_a}{c_e k_\phi I_a}. \quad (3.38)$$

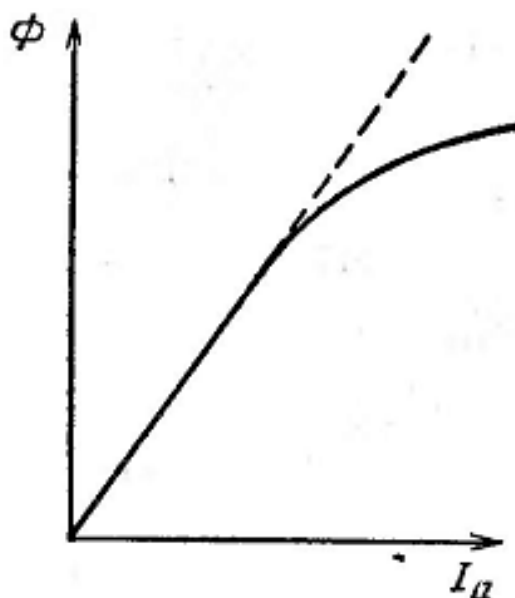


Рис. 3.19. Магнитная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

Так как падение напряжения $I_a R_a$ мало и при $I_a = I_{a.ном}$ составляет 2–4 % $U_{ном}$, то уменьшение числителя при изменении тока якоря получается весьма небольшим, и поэтому зависимость $\omega = f(I_a)$ носит гиперболический характер (штриховая линия на рис. 3.20). Особенностью скоростной характеристики двигателя последовательного возбуждения является ее большая крутизна в области малых значений тока I_a . Значительное увеличение скорости при малых нагрузках обуславливается соответствующим уменьшением магнитного потока.

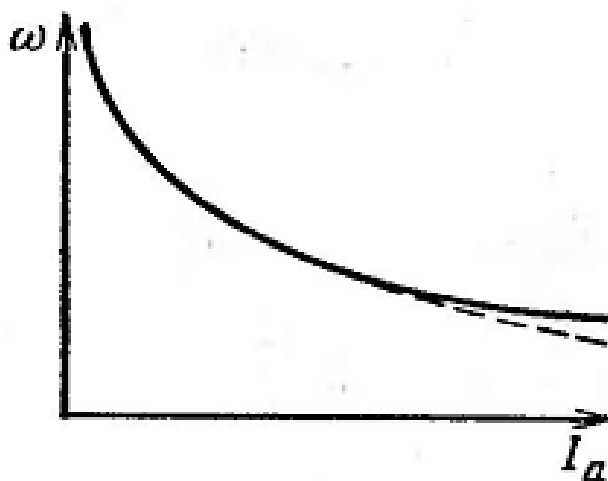


Рис. 3.20. Скоростная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

Действительная характеристика $\omega = f(I_a)$ при токах, превышающих $(0,7 - 0,8)I_{a.ном}$ будет отклоняться от гиперболической зависимости. Связано это с тем, что при больших токах вследствие насыщения магнитной цепи магнитный поток с ростом тока будет увеличиваться на меньшее значение, чем это

следует из формулы 3.37 (рис. 3.19), в результате чего угловая скорость возрастет.

Кроме того, размагничивающее действие реакции якоря, уменьшающее магнитный поток, также несколько увеличит скорость. Вследствие этих причин действительная характеристика в области больших токов пойдет выше, чем это вытекает из формулы 3.38 (сплошная кривая на рис. 3.20).

Моментная характеристика $M_{эм} = f(I_a)$ при $U = U_{ном} = const$. С учетом формулы 3.37 получим выражение для электромагнитного момента:

$$M_{эм} = c_m k_\phi I_a^2. \quad (3.39)$$

Из формулы 3.39 следует, что электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока, т. е. характеристика $M_{эм} = f(I_a)$ имеет параболическую зависимость (штриховая линия на рис. 3.21). С учетом насыщения и реакции якоря момент в области больших токов будет отклоняться от зависимости, получаемой из выражения 3.39.

Из-за этих причин магнитный поток в действительности будет меньше, что вызовет соответствующее снижение момента, и кривая $M_{эм} = f(I_a)$ при больших токах пойдет ниже (сплошная кривая на рис. 3.21).

Механическая характеристика $\omega = f(M_{эм})$ при $U = U_{ном} = const$. Согласно формуле 3.39 ток якоря равен:

$$I_a = \sqrt{\frac{M_{эм}}{c_m k_\phi}}. \quad (3.40)$$

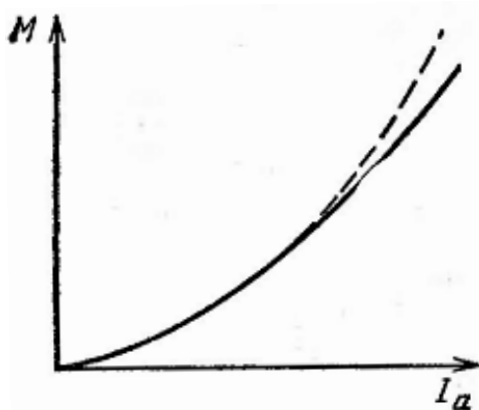


Рис. 3.21. Моментная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

Подставив выражение 3.40 в 3.38, получим уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{k_m \sqrt{M_{эм}}} - \frac{R_a}{k_m^2}, \quad (3.41)$$

где $k_m = \sqrt{c_m k_\phi}$.

Из выражения 3.41 следует, что механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения также, как и скоростная характеристика, имеет гиперболический характер (рис. 3.22).

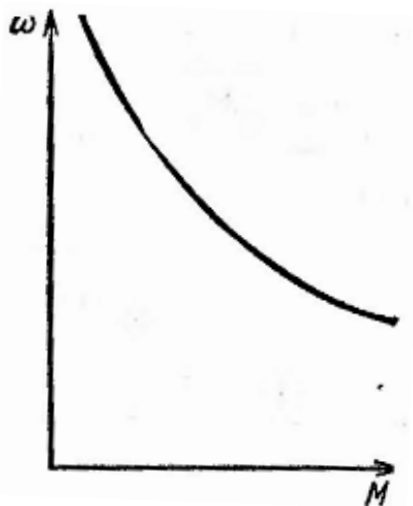


Рис. 3.22. Механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения

Вследствие сильной зависимости угловой скорости от нагрузки механические и скоростные характеристики двигателей последовательного возбуждения называют *мягкими*.

Особенно сильная зависимость скорости от нагрузки проявляется при малых значениях момента и тока якоря. При $M = 0$ и $I_a = 0$ теоретически скорость равна бесконечности, т. е. *двигатель идет вразнос*. Чрезмерное повышение скорости опасно с точки зрения механической прочности якоря, т. к. из-за больших значений центробежных сил, возникающих в этом случае, может произойти разрушение бандажей и коллектора. Поэтому нельзя допускать работу двигателя последовательного возбуждения при холостом ходе и при малых нагрузках. Обычно нагрузка не должна быть меньше 25–30 % номинальной.

Лишь малые двигатели (мощностью в десятки ватт) допускают работу при холостом ходе, так как их момент M_0 , обусловленный потерями в самом двигателе, относительно велик.

3.7 Пуск в ход двигателей постоянного тока

При пуске в ход (включении) двигателя в ход необходимо:

- 1) обеспечить надлежащий пусковой момент и условия для достижения необходимой частоты вращения;
- 2) предотвратить возникновение чрезмерного пускового тока, опасного для двигателя.

Возможны три способа пуска двигателя в ход:

1) *прямой пуск*, когда цепь якоря подключается непосредственно к сети на ее полное напряжение;

2) *пуск с помощью пускового реостата* или пусковых сопротивлений, включаемых последовательно в цепь якоря;

3) *пуск при пониженном напряжении цепи якоря*.

Пуск характеризуется:

1) кратностью пускового тока $k_i = \frac{I_n}{I_{ном}}$;

2) кратностью пускового момента $k_m = \frac{M_n}{M_{ном}}$;

3) временем (длительностью) пуска t_n .

При прямом пуске обмотка якоря подключается непосредственно к сети. Обычно в электродвигателях постоянного тока падение напряжения во внутреннем сопротивлении цепи обмотки якоря при номинальном токе составляет 5–10 % от $U_{ном}$, поэтому при прямом пуске ток якоря можно определить по выражению:

$$I_{ан} = \frac{U_a}{\sum R_a} = (10 - 20) I_{аном}, \quad (3.42)$$

что недопустимо для машины. По этой причине прямой пуск применяют только для двигателей очень малой мощности (до нескольких сотен ватт), в которых сопротивление $\sum R_a$ относительно велико и малы моменты инерции, и лишь в отдельных случаях – для двигателей мощностью в несколько кВт. При прямом пуске таких двигателей пусковой ток равен:

$$I_{ан} = (4 - 6) I_{аном}. \quad (3.43)$$

Для ограничения тока в цепь якоря включают пусковой реостат R_n (рис. 3.23, а) – *реостатный пуск*; он обычно имеет несколько ступеней (секций) R_1, R_2, R_3 , которые в процессе пуска замыкают накоротко специальными выключателями (контакторами) 1, 2 и 3. При этом сопротивление реостата постепенно уменьшается, что обеспечивает высокое значение пускового момента в течение всего времени разгона двигателя.

Рассмотрим процесс реостатного пуска на примере электродвигателя с последовательным возбуждением. В начальный момент пуска при $n = 0$ в цепь обмотки якоря вводится максимальное сопротивление $R_n = R_1 + R_2 + R_3$, вследствие чего пусковой ток согласно закону Ома равен:

$$I_n = \frac{U}{R_a + R_n}. \quad (3.44)$$

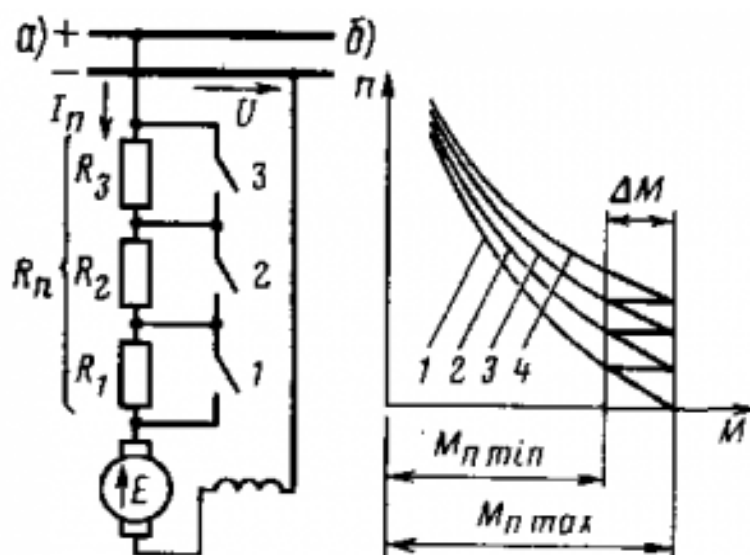


Рис. 3.23. Принципиальная схема реостатного пуска двигателя *a* и кривые изменения пускового момента *б*

Сопротивление R_n подбирают так, чтобы для машин большой и средней мощности $I_n = (1,5 \div 1,8)I_{ном}$, а для машин малой мощности $I_n = (2,0 \div 2,5)I_{ном}$. При включении в цепь обмотки якоря сопротивления R_n двигатель разгоняется по реостатной характеристике 1 (рис. 3.23, б), при этом в начальный момент пуска двигатель развивает максимальный пусковой момент M_{nmax} . Регулировочный реостат R_{pv} в этом случае выводят так, чтобы ток возбуждения I_e и поток Φ были максимальными. После того как якорь двигателя придет во вращение, в обмотке якоря индуцируется ЭДС E и ток якоря будет равен:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a + R_n}. \quad (3.45)$$

По мере разгона двигателя и увеличения частоты вращения n растет ЭДС E , вследствие чего уменьшается ток в обмотке якоря I_a и электромагнитный момент $M_{эм}$. При достижении некоторого значения M_{nmin} ступень R_1 сопротивления пускового реостата выключают, замыкая контактор 1, вследствие чего увеличивается ток I_a . Электромагнитный момент при этом возрастает до M_{nmax} , а затем с увеличением частоты вращения n постепенно уменьшается по реостатной характеристике 2, соответствующей сопротивлению реостата $R'_n = R_2 + R_3$. При уменьшении момента до M_{nmin} выключают контактором 2 часть R_2 сопротивления пускового реостата, и двигатель переходит на работу по характеристике 3, соответствующей сопротивлению $R''_n = R_3$. Таким способом, уменьшая постепенно сопротивление пускового реостата, осуществляют разгон двигателя по отдельным отрезкам реостатных характеристик 1, 2 и 3 до выхода на естественную характеристику 4, соответствующую сопротивлению $R_n = 0$. Пусковой

момент двигателя при этом изменяется от $M_{n \min}$ до $M_{n \max}$. Число ступеней пускового реостата зависит от жесткости естественной механической характеристики 4 и требований, предъявляемых к плавности пуска. Пусковые реостаты рассчитывают на кратковременную работу под током. При пуске двигателя указанным способом частота вращения его якоря возрастает по ломаной кривой 1 (рис. 3.24), а ток обмотки якоря изменяется по ломаной кривой 2 между двумя крайними значениями пускового тока $I_{n \max}$ и $I_{n \min}$.

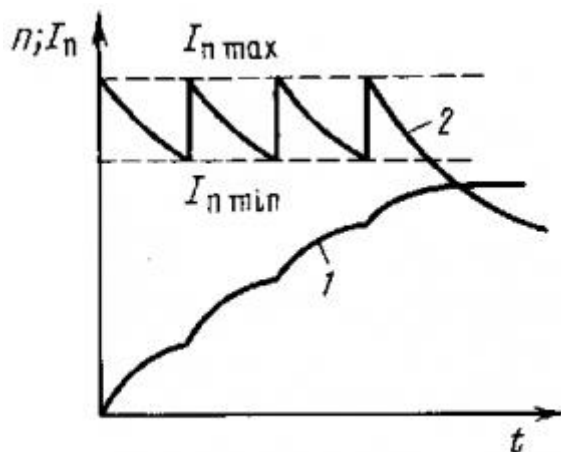


Рис. 3.24. Кривые изменения тока и частоты вращения при пуске двигателя

При реостатном пуске возникают довольно большие потери энергии. Этот недостаток можно устранить, если включать двигатель путем *плавного повышения напряжения*, подаваемого на обмотку якоря. Такой пуск называют *безреостатным*. Для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель). Безреостатный пуск применяют на электроподвижном составе переменного тока и тепловозах.

3.8 Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока находят применение в установках, где требуется регулировать угловую скорость. Угловую скорость двигателей возможно регулировать тремя способами:

- 1) изменением сопротивления в цепи якоря;
- 2) изменением магнитного потока (тока возбуждения);
- 3) изменением подводимого напряжения.

При сопоставлении характеристик двигателя в процессе регулирования за исходные принимают скоростную или механическую характеристики, полученные при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения, а также при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря. Такие характеристики называют *естественными*. Характеристики, полученные при напряжениях и токах возбуждения, отличных от номинальных, или при наличии добавочного сопротивления в цепи якоря, называются *искусственными*.

Регулирование скорости изменением сопротивления в цепи якоря.

При включении последовательно в цепь якоря регулировочного резистора R_{ad} (рис. 3.25) увеличится падение напряжения, что повлечет за собой уменьшение наводимой в обмотке якоря ЭДС $E = c\omega \Phi$. При $\Phi = const$ уменьшение ЭДС может произойти за счет снижения угловой скорости.

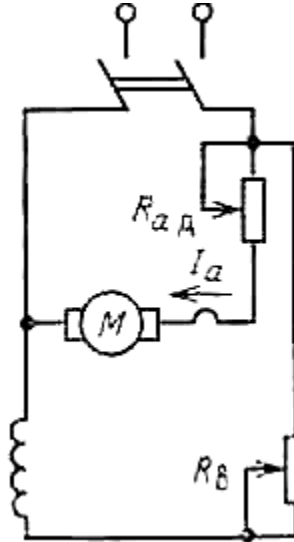


Рис. 3.25. Схема регулирования угловой скорости двигателя введением в цепь якоря резистора R_{ad}

Отсюда следует, что посредством резистора R_{ad} можно регулировать угловую скорость в сторону ее уменьшения.

Уравнения скоростной и механической характеристик для этого случая будут иметь вид:

$$\omega = \frac{U - I_a (R_a + R_{ad})}{c\Phi}; \quad \omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(R_a + R_{ad})}{c^2\Phi^2}, \quad (3.46)$$

где $\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi$.

По этим уравнениям на рис. 3.26 построены механические (скоростные) характеристики для двигателя независимого (параллельного) возбуждения при различных значениях R_{ad} и $U = const$ и $I_e = const$.

Верхняя характеристика является естественной.

Из формулы 3.46 и рис. 3.26 следует, что все характеристики исходят из одной точки, соответствующей скорости при идеальном холостом ходе ($I_a = 0$ и $M = 0$):

$$\omega_{0u} = \frac{U}{c\Phi_0}, \quad (3.47)$$

откуда также следует, что чем больше значение R_{ad} , тем сильнее изменяется угловая скорость с увеличением нагрузки, т. е. характеристики становятся менее жесткими.

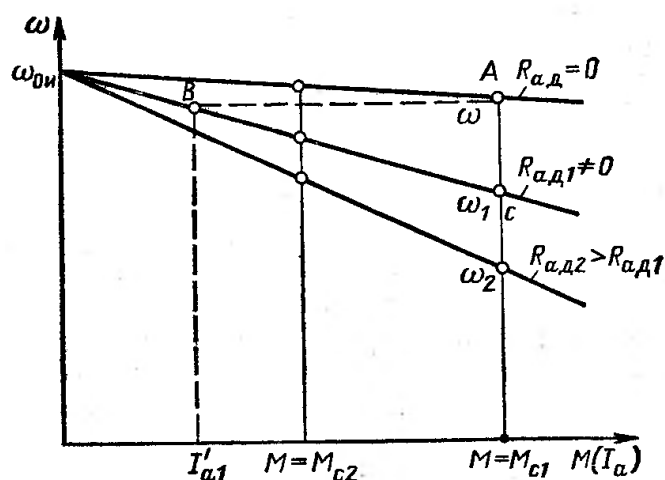


Рис. 3.26. Механические характеристики двигателей независимого и параллельного возбуждения при различных значениях R_{ad}

Скорость, с которой двигатель будет работать на искусственных характеристиках в установившемся режиме, определяется точками пересечения механических характеристик двигателя и соединенного с ним производственного механизма. Точка пересечения характеристик соответствует равенству моментов M и M_c .

Если принять характеристику статического сопротивления $M_{c1} = M_2 = const$, то согласно рис. 3.26 угловые скорости будут равны ω , ω_1 , ω_2 и т. д. Рассматриваемым способом уменьшать скорость можно в широких пределах, вплоть до нулевого ее значения.

Однако механические характеристики, соответствующие низким скоростям, настолько круты, что работа на них протекает нестабильно. Нестабильность работы проявляется в том, что возможные небольшие колебания момента будут вызывать относительно большие колебания угловой скорости или даже остановку двигателя. Это обстоятельство во многих случаях ограничивает предел регулирования.

Предел регулирования, т. е. отношение $\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ будет зависеть от значения наибольшего сопротивления $R_{ad\max}$, включенного в цепь якоря. Из-за снижения жесткости искусственной характеристики при $R_{ad\max}$ пределы регулирования не остаются постоянными при различных нагрузках.

При снижении M_c (до M_{c2} на рис. 3.26) пределы регулирования уменьшаются.

При данном способе регулирования возникают значительные потери в регулировочном реостате, что вызывает снижение КПД. Действительно, если двигатель работает с $M = M_c = c\Phi I_a = const$, то при $I_a = const$ ($\Phi = const$) ток в якоре при всех скоростях будет иметь одно и то же значение. Следовательно, и подво-

димая к цепи якоря мощность $P_1 = UI_a$ остается также постоянной. Полезная механическая мощность, снимаемая с вала машины, зависит от угловой скорости:

$$P_2 = M_c \omega. \text{ Тогда КПД } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_c \omega}{UI_a} \equiv \omega, \text{ откуда следует, что КПД пропорциона-}$$

лен угловой скорости. Чем меньше скорость, тем ниже будет КПД. По этой причине рассматриваемый способ регулирования является неэкономичным и имеет ограниченное применение.

Переход с одной скорости на другую, например с ω на ω_1 происходит следующим образом. Предположим, что на естественной характеристике двигатель работает в точке А с моментом $M = c\Phi I_{a1} = M_{c1}$. Угловая скорость при этом равна

$$\omega, \text{ а ток в цепи якоря } I_{a1} = \frac{U - E}{R_a}. \text{ При включении резистора } R_{a\partial 1} \text{ в первый мо-}$$

мент времени из-за механической инерции якоря скорость, а следовательно, и ЭДС $E = c\omega\Phi$ при $\Phi = const$ не изменится (двигатель из точки А перейдет в точку В).

Тогда ток в цепи якоря уменьшится и будет равен:

$$I'_{a1} = \frac{U - E}{R_a + R_{a\partial 1}}. \quad (3.48)$$

Электромагнитный момент M , развиваемый двигателем при токе I'_{a1} , станет меньше M_{c1} , и угловая скорость начнет уменьшаться. С уменьшением скорости ЭДС также уменьшается, а ток в якоре увеличивается. Это будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие моментов $M = M_{c1}$, при этом ток в якоре будет равен прежнему значению I_{a1} , а скорость $\omega_1 < \omega$).

Регулирование скорости изменением сопротивления цепи якоря было рассмотрено на примере двигателей параллельного и независимого возбуждения. Однако все сказанное применимо и для двигателей последовательного и смешанного возбуждения. Для примера на рис. 3.27 показаны механические характеристики двигателя последовательного возбуждения с различными сопротивлениями в цепи якоря.

Регулирование скорости изменением потока.

Регулирование потока двигателя осуществляется изменением тока возбуждения. Так как в номинальном режиме (на естественной характеристике) двигатель рассчитывается на работу почти с наибольшими значениями потока и тока возбуждения, то регулирование можно осуществить только в сторону их уменьшения. Уменьшение магнитного потока ведет к увеличению угловой скорости. Т. е. в этом случае осуществляется регулирование скорости вверх от основной. Если не учитывать изменение потока из-за реакции якоря, то скоростные характеристики $\omega = f(I_a)$ двигателей независимого и параллельного возбуждения при $U = const$ и $I_g = const$ будут представлять собой прямые линии (сплошные линии на рис. 3.28). В соответствии с определенным значением потока каждая из

характеристик при идеальном холостом ходе имеет свою скорость $\omega_{0u} = \frac{U}{c\Phi_0}$. Из-за возрастания механических потерь с повышением скорости ток холостого хода I_0 будет увеличиваться.

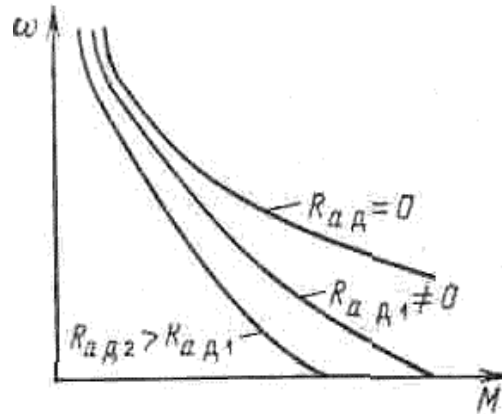


Рис. 3.27. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при различных значениях $R_{ад}$

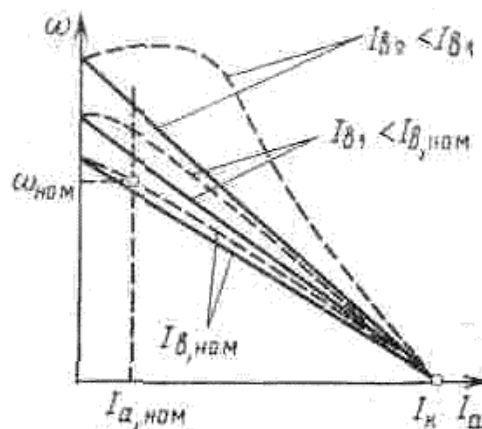


Рис. 3.28. Скоростные характеристики двигателей независимого и параллельного возбуждения при различных токах возбуждения

Все скоростные характеристики пересекаются с осью абсцисс в одной точке ($\omega = 0$), соответствующей току короткого замыкания $I_k = \frac{U}{R_a}$.

Механические характеристики, приведенные на рис. 3.29, имеют при идеальном холостом ходе те же скорости ω_{0u} , что и скоростные. Однако с осью абсцисс они будут пересекаться в разных точках, так как при одном и том же токе I_k и $\Phi = var$ пусковые моменты будут различны. Сплошными линиями на рис. 3.29 показаны характеристики без учета влияния реакции якоря.

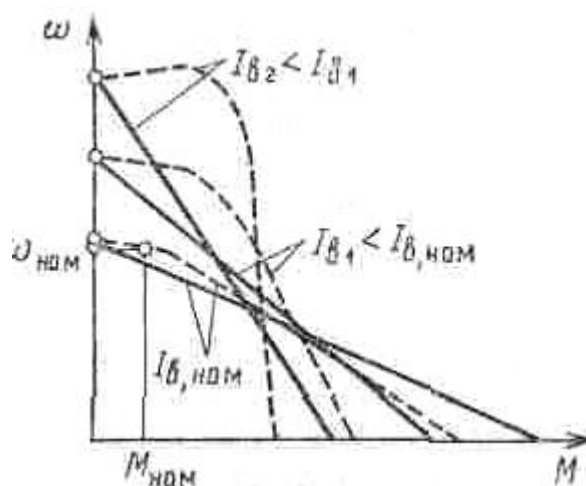


Рис. 3.29. Механические характеристики двигателей независимого и параллельного возбуждения при различных токах возбуждения

Как видно на рис. 3.29, характеристики $\omega = f(M)$ пересекаются между собой, поэтому при нагрузочных моментах, лежащих за точками пересечения, уменьшение потока будет вызывать не увеличение угловой скорости, а ее уменьшение. Чем больше сопротивление цепи якоря R_a , тем меньшим значениям момента будут соответствовать точки пересечения механических характеристик между собой. Для большинства двигателей эти моменты будут значительно больше номинального и поэтому в пределах практически возможных изменений нагрузки скорость с уменьшением потока возрастает.

Уменьшение скорости при ослаблении поля может наблюдаться лишь в машинах малой мощности.

Характеристики на рис. 3.28 и 3.29 построены в предположении, что при изменении I_a и M магнитный поток $\Phi = const$. Если учесть влияние размагничивающего действия реакции якоря, то они пройдут немного выше и при малых токах возбуждения могут приобрести возрастающий характер (штриховые кривые на рис. 3.28 и 3.29). Работа двигателя при возрастающих характеристиках носит неустойчивый характер. Уменьшение магнитного потока из-за размагничивающего действия реакции якоря приводит также к снижению пускового момента.

Неустойчивая работа двигателя при малых токах возбуждения является одной из причин, ограничивающих верхний предел угловой скорости при этом способе регулирования. Другой причиной, ограничивающей максимальную скорость, является ухудшение коммутации. Обычно дополнительные полюсы в машинах постоянного тока настраиваются на получение несколько ускоренной коммутации. Поэтому коммутирующую ЭДС e_k выбирают несколько большей, чем требуется для компенсации реактивной ЭДС e_r . Разность этих ЭДС в номинальном режиме (при $\omega = \omega_{ном}$) принимают такой, чтобы обеспечить оптимальное протекание коммутационного процесса. При повышении скорости пропорционально увеличиваются e_k и e_r , а следовательно, и их разность $e_k - e_r$. При определенной скорости эта разность может достигнуть недопустимого значения.

Коммутация будет сильно ускоренной, появятся ток разрыва и искрение щеток. Нормальная работа машины будет невозможна. Кроме того, коммутация при высоких скоростях ухудшается из-за повышенной вибрации щеточного аппарата, а также вследствие увеличения максимального напряжения между соседними коллекторными пластинами в результате сильного искажения магнитного поля из-за поперечной реакции якоря при малых токах возбуждения.

По указанным причинам в машинах нормального исполнения пределы регулирования частоты вращения изменением магнитного потока составляют (1,5-2,5):1. В специально спроектированных двигателях предел регулирования может быть повышен до 10:1.

Особенностью регулирования угловой скорости рассматриваемым способом является изменение допустимого нагрузочного момента при переходе с одной искусственной характеристики на другую. Связано это с тем, что по условиям нагрева двигателя нельзя допустить, чтобы по обмотке якоря длительно протекал ток выше номинального, т. е. $\frac{M_{сдон}}{c\Phi} \leq I_{аном}$. Отсюда следует, что при уменьшении потока пропорционально должен снижаться допустимый нагрузочный момент $M_{сдон}$. Так как $\omega \approx \frac{1}{\Phi}$, то допустимая мощность на валу двигателя $P_2 = M_{сдон}\omega$ при этом будет оставаться постоянной. Поэтому принято считать, что регулирование скорости изменением потока происходит с постоянной мощностью.

В отличие от этого регулирование угловой скорости изменением сопротивления в цепи якоря, когда при $\Phi = \text{const}$ допустимый нагрузочный момент $M_{сдон} = M = c\Phi I_a = \text{const}$, называется регулированием с *постоянным моментом*. Мощность P_2 в этом случае будет изменяться пропорционально ω .

Регулирование угловой скорости изменением магнитного потока является одним из наиболее простых способов и поэтому находит широкое применение. В двигателях последовательного возбуждения регулирование угловой скорости осуществляется шунтированием обмотки возбуждения (рис. 3.30, а). Ток в обмотке возбуждения при этом будет равен:

$$I_g = I_a \frac{R_{usc}}{R_{usc} + r_c} = I_a \frac{1}{1 + \frac{r_c}{R_{usc}}}, \quad (3.49)$$

где r_c, R_{usc} – сопротивления последовательной обмотки и шунтирующего резистора.

Чем меньше сопротивление R_{usc} , тем ниже будут ток I_g и магнитный поток Φ . С уменьшением магнитного потока Φ угловая скорость возрастает. На рис. 3.30, б показаны механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при $R_{usc} = \infty$ (естественная) и $\infty > R_{usc} > 0$.

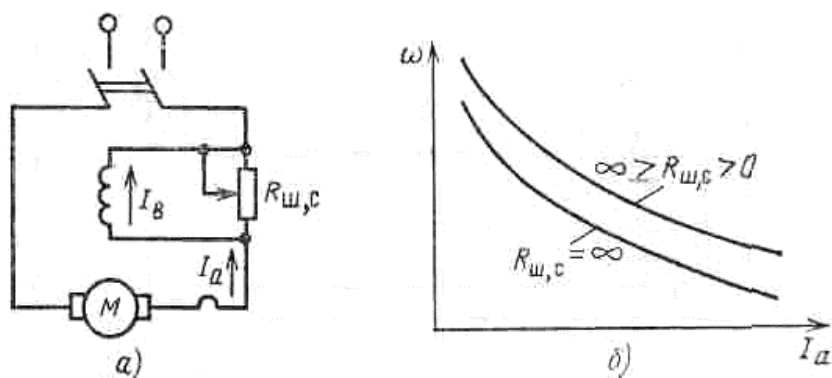


Рис. 3.30. Регулирование угловой скорости двигателя последовательного возбуждения изменением тока возбуждения:
 а – схема; б – скоростные характеристики

В двигателях смешанного возбуждения ослабление потока производят уменьшением тока в параллельной обмотке возбуждения. Пределы регулирования скорости этих двигателей такие же, как и у двигателей параллельного возбуждения. Так же как и у двигателей параллельного возбуждения, такой способ регулирования является экономичным.

Регулирование скорости изменением подводимого напряжения

Угловая скорость двигателей постоянного тока примерно пропорциональна приложенному напряжению U . Отсюда следует, что изменением U возможно осуществить регулирование скорости. Поскольку работа двигателя при $U > U_{ном}$ недопустима, то данный способ дает возможность регулировать угловую скорость в сторону ее понижения.

Реализация этого способа возможна в том случае, если двигатель получает питание от отдельного источника. В качестве источника может быть использован генератор постоянного тока независимого возбуждения. Такие системы, состоящие из генератора и подключенного к нему двигателя, называются *системой генератор-двигатель*, или *системой Г-Д*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 320 с.
- 2 **Жуловян, В. В.** Электрические машины : электромеханическое преобразование энергии : учебное пособие для вузов / В. В. Жуловян. – Москва : Юрайт, 2019. – 425 с.
- 3 **Игнатович, В. М.** Электрические машины и трансформаторы : учебное пособие для академического бакалавриата / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. – 6-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 181 с. – ISBN 978-5-534-00881-4.
- 4 **Копылов, И. П.** Электрические машины : В 2 т. Т. 2 : учебник для академического бакалавриата / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 407 с.
- 5 Основы электромеханики : учебное пособие / В. П. Кочетков, В. Я. Беспалов, Е. Я. Глушкин [и др.] ; под редакцией В. П. Кочеткова. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 639 с.
- 6 **Трубицина, Н. А.** Принцип действия и конструкция электрических машин и трансформаторов : учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Н. А. Трубицина, М. А. Трубицин ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2015. – 39 с.

Учебное издание

Соломин Владимир Александрович
Трубицина Надежда Анатольевна
Замшина Лариса Леонидовна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 2

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Редактор К. И. Паханова
Техническое редактирование и корректура К. И. Пахановой

Подписано в печать 09.12.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 5,11. Тираж 500 экз. Изд. № 46. Заказ .

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2, www.rgups.ru