Министерство образования, науки и
молодежной политики Нижегородской области
Государственное автономное
профессиональное образовательное учреждение
«Городецкий Губернский колледж»

Учебное пособие

Техническая эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики

специальности 26.02.06 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики

Раздел III

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

г. Городец

2022 г.

Печатается по решению методического совета
ГАПОУ «Городецкий Губернский колледж

Рецензенты:
Ериков Валерий Иванович – кандидат педагогических наук,
директор ГАПОУ «Городецкий Губернский колледж»;
Гуняков Станислав Яковлевич – ветеран труда, преподаватель
ГАПОУ «Городецкий Губернский колледж»;
Железов Валерий Витальевич – механик – наставник СК «ООО Ярбункер».

Учебное пособие «Техническая эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» для обучающихся специальности 26.02.06 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики среднего профессионального образования.
г. Городец, ГАПОУ «Городецкий Губернский колледж», 2022г.

Учебное пособие предназначено для обучающихся профессиональных образовательных организаций среднего профессионального образования специальности 26.02.06. Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики. Разработано в соответствии с требованиями ФГОС СПО и содержанием ПМ.01 Техническая эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики.

Пособие содержит теоретический материал, подробные примеры расчетов по каждому разделу, контрольные вопросы для обучающихся по темам раздела.

Учебное пособие может быть использовано так же для студентов высших образовательных организаций, для обучения слушателей курсов повышения квалификации специальности «Электромеханик».

Составитель - Матросов А.В. – зав. отделением технических специальностей и профессий, преподаватель ГАПОУ «Городецкий Губернский колледж»

Редактор: Ржевская Т.Ф. - методист ГАПОУ «Городецкий Губернский колледж»

Оглавление

Глава I. «Назначение, принцип действия и устройство коллекторных машин постоянного тока» 4
1.1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока 4
1.2. Устройство коллекторной машины постоянного тока 6
Глава II. Обмотки якоря машин постоянного тока. 10
2.1.Петлевые обмотки якоря 10
2.2. Волновые обмотки якоря 15
2.3. Уравнительные соединения и комбинированная обмотка якоря 17
2.4. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока 21
2.5. Выбор типа обмотки якоря 25
Контрольные вопросы 26
Глава III. Магнитная цепь машины постоянного тока 26
3.1.Магнитное поле четырехполюсной машины 26
3.2. Реакция якоря машины постоянного тока 29
3.3. Учет размагничивающего влияния реакции якоря 32
3.4. Устранение вредного влияния реакции якоря 34
3.5. Способы возбуждения машин постоянного тока 35
Контрольные вопросы 36
Глава IY. Коммутация в машинах постоянного тока. 36
4.1.Причины, вызывающие искрение на коллекторе 37
4.2. Прямолинейная коммутация 38
4.3. Криволинейная замедленная коммутация 40
4.4. Способы улучшения коммутации 44
4.5. Круговой огонь по коллектору 48
4.6. Радиопомехи от коллекторных машин и способы их подавления 49
Глава Y. Коллекторные генераторы постоянного тока 51
5.1. Основные понятия 51
5.3. Генератор параллельного возбуждения 56
5.4. Генератор смешанного возбуждения 58
Контрольные вопросы 59
Глава YI. Работа коллекторных машин постоянного тока в режиме двигателя. 60
6.1. Основные понятия 60
6.2. Пуск двигателя 61
6.3. Двигатель параллельного возбуждения 63
6.4. Регулирование частоты вращения двигателей параллельного возбуждения 65
6.5. Режимы работы машины постоянного тока 69
6.6. Двигатель последовательного возбуждения 70
6.7. Двигатель смешанного возбуждения 73
6.8. Потери и коэффициент полезного действия коллекторной машины постоянного тока 74
6.9. Машины постоянного тока серий 4П и 2П 77
6.10. Универсальные коллекторные двигатели 79
Контрольные вопросы 81
Список используемой литературы 82

Глава I. «Назначение, принцип действия и устройство коллекторных машин постоянного тока»

Электрические машины постоянного тока используются как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей. Наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока, области применения и диапазон мощности которых достаточно широки: от долей ватт (для привода устройств автоматики) до нескольких тысяч киловатт (для привода прокатных станов, шахтных подъемников и других механизмов). Двигатели постоянного тока широко используются для привода подъемных средств в качестве крановых двигателей и привода транспортных средств в качестве тяговых двигателей. Основные преимущества двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока — хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин, а недостатки - относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении и пониженная надежность. Все эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности. Эти недостатки ограничиваю! применение машин постоянного тока.

В данном разделе рассмотрены машины постоянного тока общего назначения, получившие наибольшее применение в современном электроприводе. Рассмотрены также некоторые виды машин постоянного тока специального назначения, главным образом применяемые в устройствах автоматики.

В заключение следует отметить, что наибольшее практическое применение получили машины постоянного тока в качестве электродвигателей. Объясняется это возрастающим применением в качестве источников постоянного тока полупроводниковых выпрямительных устройств, имеющих более высокие технико-экономические показатели по сравнению с коллекторными генераторами постоянного тока.

1.1. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них коллектора — механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рис. 24.1 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора — якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) — источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка $a,b,c,d,$ концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки A *и* $B,$ осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением R.

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой $e = 2Blv$, а направление для положения якоря, изображенного на рисунке, указано стрелками.

В процессе работы генератора якорь вращается и виток $a,b,c,d,$ занимает разное пространственное положение, поэтому *в обмотке якоря наводится переменная ЭДС.* Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке R) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в

пульсирующий ток во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 24.1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки *А* к витка якоря, показанном на рис. 24.1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки *А* к щетке *В;* следовательно, щетка *А* является положительной, а щетка *В* -- отрицательной. После

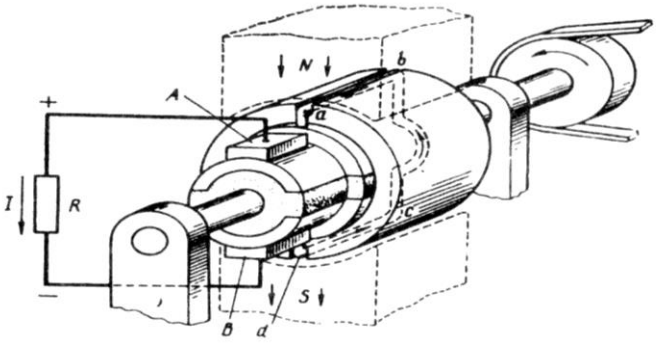


Рис. 1.1. Упрощенная модель коллекторной машины

поворота якоря на 180^0 (рис. 1.2, *а*) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление не тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 1.2, *б).* Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой *А* всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой *В* - пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабится при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе.

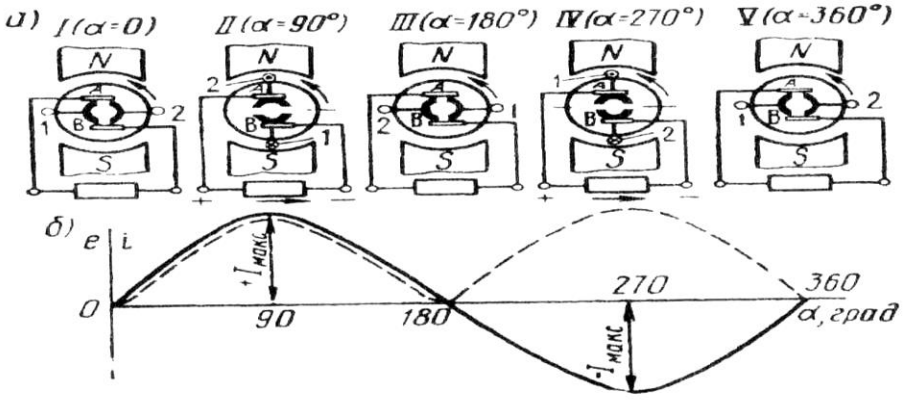


Рис. 1.2. К принципу действия генератора постоянного тока:
ЭДС и ток в обмотке якоря; ЭДС и ток во внешней цепи генератора

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора *R* и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке *А* подключить зажим «плюс», а к щетке *В* «минус», то в обмотке якоря появится ток I , направление которого показано на рис. 1.3. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{ЭМ}$, создающие на якоре электромагнитный момент *М* и вращающие его против часовой стрелки. После поворота

якоря на 180^0 электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока. Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока — изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

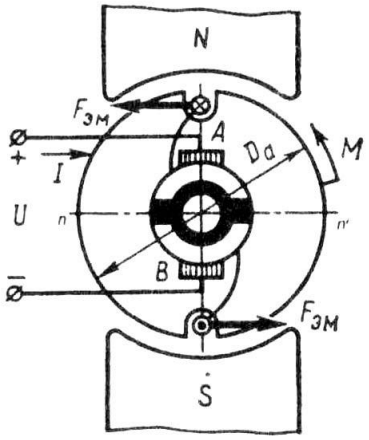


Рис. 1.3. К принципу действия двигателя постоянного тока

Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, так как при прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтрали nn' (рис. 1.3) электромагнитные силы $F_{ЭМ} = 0$ (магнитная индукция в середине межполосного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

1.2. Устройство коллекторной машины постоянного тока

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготовляют электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в самых различных отраслях промышленности, поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова. Неподвижная часть машины постоянного тока называется статором, вращающаяся часть - якорем (рис. 1.4).

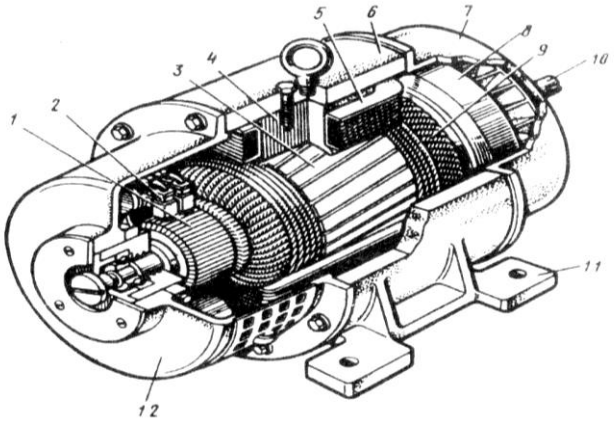


Рис. 1.4. Устройство машины постоянного тока

Статор. Состоит из станины 6 и главных полюсов 4. Станина 6 служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготовляют из стали — материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы 11 для крепления машины к фундаментной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов 4. Обычно станину делают цельной из стальной трубы, либо сварной из листовой стали, за исключением машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника *6* и полюсной катушки *5*. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например марки 3411. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.

В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными — намоткой медного обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку (рис. 1.5, *а*). В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса (рис. 1.5, *б*). В некоторых конструкциях машин полюсную катушку для более интенсивного охлаждения разделяют по высоте на части, между которыми оставляют вентиляционные каналы.

Якорь. Якорь машины постоянного тока (рис. 1.4) состоит из вала *10*, сердечника *3* с обмоткой и коллектора *7*. Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части *9* обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом.

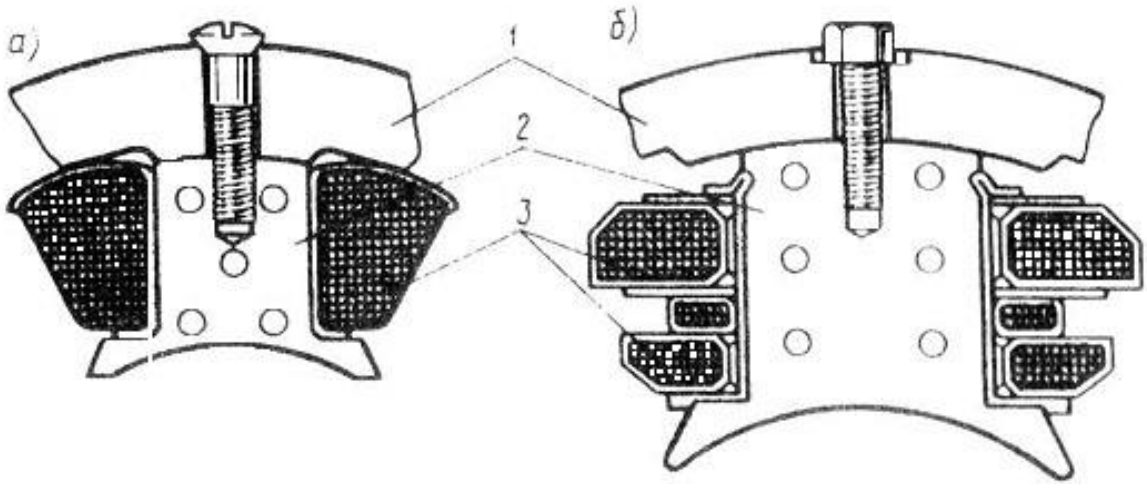


Рис.1.5. Главные полюсы с бескаркасной *(а)* и каркасной (*б)* полюсными катушками:

1 — станина, *2* — сердечник полюса, *3* — полюсная катушка

Коллектор 1 является одним из сложных узлов машины постоянного тока. Основными элементами коллектора являются пластины трапецеидального сечения из твердотянутой меди, собранные таким образом, что коллектор приобретает цилиндрическую форму. В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами и на пластмассе. На рис. 1.6, *а* показано устройство коллектора со стальными конусными шайбами. Нижняя часть коллекторных пластин *6* имеет форму «ласточкина хвоста». После сборки коллектора эти части пластин оказываются зажатыми между стальными шайбами *1 и 3,* изолированными от медных пластин миканитовыми манжетами *4.* Конусные шайбы стянуты винтами *2.* Между медными пластинами расположены миканитовые изоляционные прокладки. В процессе работы машины рабочая поверхность коллектора постепенно истирается щетками. Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью коллектора, что вызвало бы вибрацию щеток и нарушение работы машины, между коллекторными пластинами фрезеруют пазы (дорожки) на глубину до 1,5 мм (рис. 1.6, *б*). Верхняя часть *5* коллекторных пластин (см. рис. 1.6, *а*), называемая петушком, имеет узкий продольный паз, в который закладывают проводники обмотки якоря и тщательно припаивают.

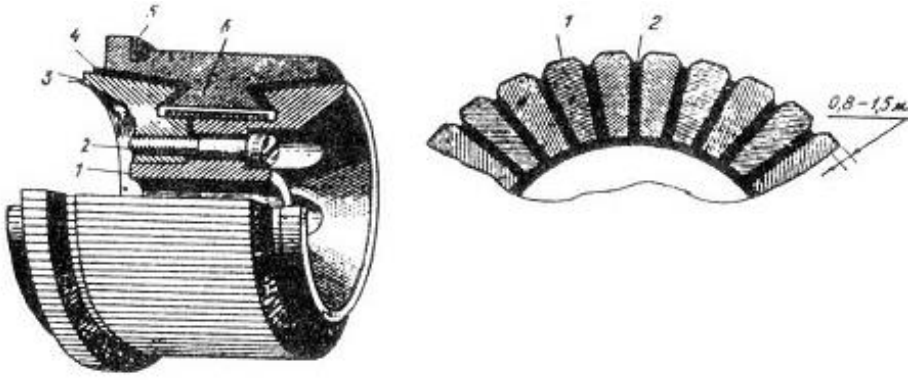


Рис. 1.6 Устройство коллектора с конусными шайбами

В машинах постоянного тока малой мощности часто применяют *коллекторы на пластмассе,* отличающиеся простотой в изготовлении. Набор медных и миканитовых пластин в таком коллекторе удерживается пластмассой, запрессованной в пространство между набором пластин и стальной втулкой *4* и образующей корпус коллектора. Иногда с целью увеличения прочности коллектора эту пластмассу *2* армируют стальными кольцами *3*

(рис. 1.7). В этом случае миканитовые прокладки должны иметь размеры большие, чем у медных пластин *1,* что исключит замыкание пластин стальными (армирующими) кольцами *3.*

Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством щеток, располагаемых в щеткодержателях *4* (см. рис. 1.4).

Щеткодержатель (рис. 1.8) состоит из обоймы *4,* в которую помещают щетку *3,* курка *1,* представляющего собой откидную деталь, передающую давление пружины *2* на щетку. Щеткодержатель крепят на пальце зажимом *5.* Щетка снабжается гибким тросиком *6* для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины. Одно из основных условий бесперебойной работы машины — плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим — искрение на коллекторе.

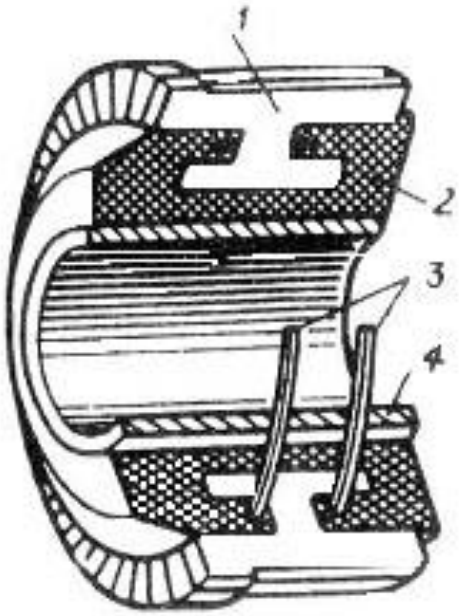


Рис. 1.7. Устройство коллектора на пластмассе

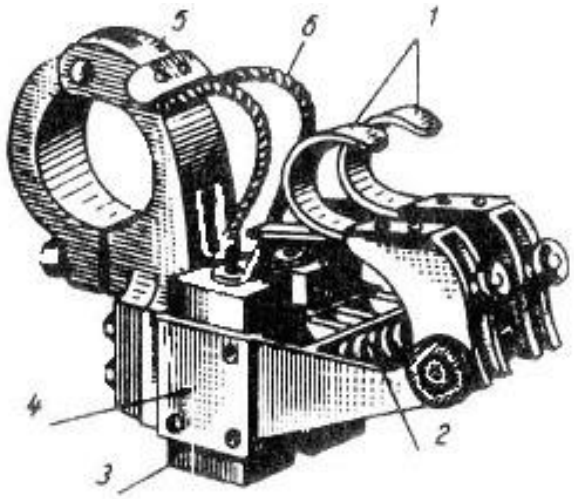


Рис. 1.8. Щеткодержатель (сдвоенный)
машины постоянного тока

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита: передний *12* (со стороны коллектора) и задний 7 (см. рис. 1.4). В центральной части щита имеется расточка под подшипник. На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки, не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор *8* служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что непременным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел — механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности и имеют более высокую стоимость.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение коллектора в генераторе и двигателе?
2. Почему станину машины делают из стали?
3. Каково назначение конусных шайб в коллекторе?
4. Зачем в коллекторе на пластмассе применяют армирующие кольца?

Глава II. Обмотки якоря машин постоянного тока.

2.1.Петлевые обмотки якоря

Основные понятия. Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.

Элементом обмотки якоря является *секция* (катушка), присоединенная к двум коллекторным пластинам. Расстояние между пазовыми частями секции должно быть равно или мало отличаться от полюсного деления τ (рис. 2.1):

$$\tau = \pi D_a /(2p)\,. \qquad (2.1)$$

Здесь D_a — диаметр сердечника якоря, мм.

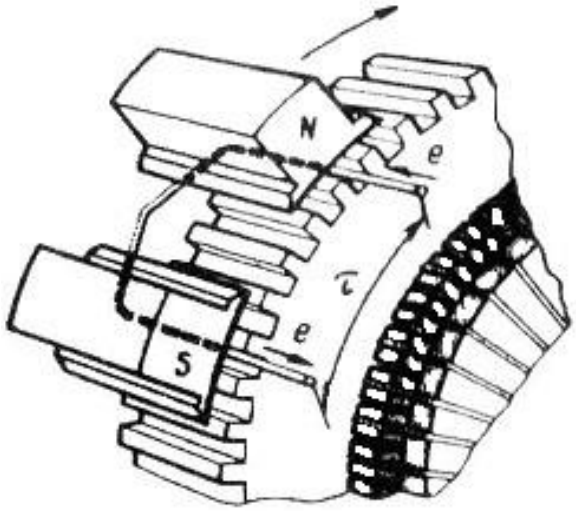


Рис. 2.1. Расположение пазовых сторон секции на сердечнике якоря

Обмотки якоря обычно выполняют двухслойными. Они характеризуются следующими параметрами: числом секций *S*; числом пазов (реальных) Z; числом секций, приходящихся на один паз, $S_n = S / Z$ *;* числом витков секции w_c; числом пазовых сторон в обмотке *N;* числом пазовых сторон в одном пазу $n_n = N / Z = 2w_c S_n$. Верхняя пазовая сторона одной секции и нижняя пазовая сторона другой секции, лежащие в одном пазу, образуют *элементарный паз.* Число элементарных пазов в реальном пазе Z_n определяется числом секций, приходящихся на один паз: $S_n = S / Z$ (рис. 2.2).

Схемы обмоток якоря делают *развернутыми,* при этом все секции показывают одновитковыми. В этом случае каждой секции, содержащей две пазовые стороны, соответствует один элементарный паз. Концы секций присоединяют к коллекторным пластинам, при этом к каждой пластине присоединяют начало одной секции и конец другой, т. е. на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина. Таким образом, для обмотки якоря справедливо $S = Z_Э = K$, где $Z_Э$ — число элементарных пазов; *K* — число коллекторных пластин в коллекторе. Число секций, приходящихся на один реальный паз, определяется отношением $Z_Э / Z$.

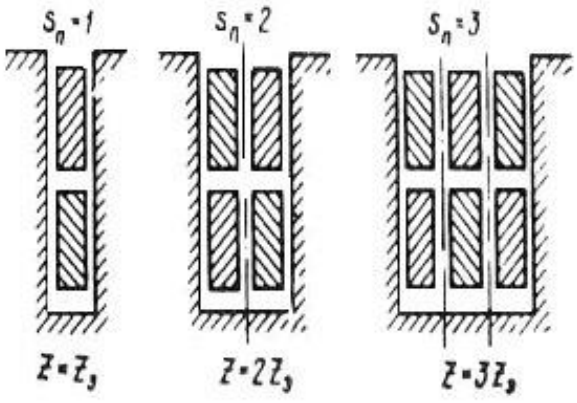


Рис. 2.2. Элементарные пазы

Простая петлевая обмотка якоря. В простой петлевой обмотке якоря каждая секция присоединена к двум рядом лежащим коллекторным пластинам. При укладке секций на сердечнике якоря начало каждой последующей секции соединяется с концом предыдущей, постепенно перемещаясь при этом по поверхности якоря (и коллектора) так, что за один

обход якоря укладывают все секции обмотки. В результате конец последней секции оказывается присоединенным к началу первой секции, т. е. обмотка якоря замыкается.

На рис. 2.3, *а, б* изображены части развернутой схемы простой петлевой обмотки, на которых показаны шаги обмотки — расстояния между пазовыми сторонами секций по якорю: *первый частичный шаг по якорю* y_1, *второй частичный шаг по якорю* y_2 *и результирующий шаг по якорю* y.

Если укладка секций обмотки ведется слева направо по якорю, то обмотка называется *правоходовой* (рис. 2.3, *а*), а если укладка секций ведется справа налево, то обмотка называется *левоходовой* (рис. 2.3, *б*). Для правоходовой обмотки результирующий шаг

$$y = y_1 = y_2 . \qquad (2.2)$$

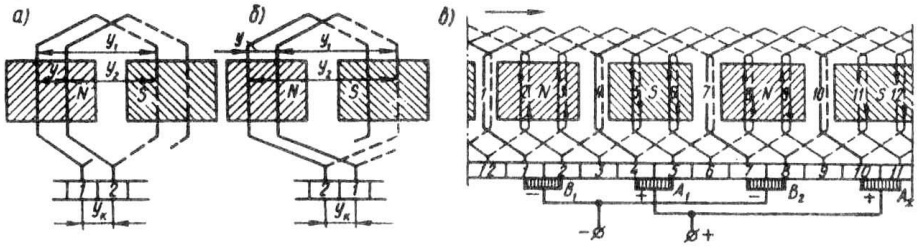


Рис. 2.3. Простая петлевая обмотка:

а — правоходовая; *б* — левоходовая; *в* — развернутая схема

Расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец одной секции, называют *шагом обмотки по коллектору* $y_к$. Шаги обмотки по якорю выражают в элементарных пазах, а шаг по коллектору — в коллекторных делениях (пластинах).

Начало и конец каждой секции в простой петлевой обмотке присоединены к рядом лежащим коллекторным пластинам, следовательно, $y = y_к = \pm 1$, где знак плюс соответствует правоходовой обмотке, а знак минус — левоходовой.

Для определения всех шагов простой петлевой обмотки достаточно рассчитать первый частичный шаг по якорю:

$$y_1 = \left[Z_э /(2p)\right] \mp \varepsilon , \qquad (2.3)$$

где ε — некоторая величина, меньшая единицы, вычитая или суммируя которую получают значение шага y_1, равное целому числу.

Второй частичный шаг обмотки по якорю

$$y_2 = y_1 \mp y = y_1 \mp 1 \qquad (2.4)$$

Пример 2.1. Рассчитать шаги и выполнить развернутую схему простой петлевой обмотки якоря для четырехполюсной машины ($2p = 4$) постоянного тока. Обмотка правоходовая, содержит 12 секций.

Решение. Первый частичный шаг по якорю по (25.3)

$$y_1 = \left[Z_э /(2p)\right] \mp \varepsilon = (12/4) \mp 0 = 3 \text{ паза.}$$

Второй частичный шаг по якорю по (25.4)

$$y_2 = y_1 - y = 3 - 1 = 2 \text{ паза.}$$

Прежде чем приступить к выполнению схемы обмотки, необходимо отметить и пронумеровать все пазы и секции, нанести на предполагаемую схему контуры магнитных полюсов и указать их полярность (2.3, в). При этом нужно иметь в виду, что отмеченный на схеме контур является не полюсом, а зеркальным отображением полюса, находящегося над якорем. Затем изображают коллекторные пластины и наносят на схему первую секцию, пазовые части которой располагают в пазах *1* и *4*. Коллекторные пластины, к которым присоединены начало и конец этой секции, обозначают *1* и *2*. Затем нумеруют все остальные

пластины и наносят на схему остальные секции (*2, 3, 4* и т. д.). Последняя секция *12* должна замкнуть обмотку, что будет свидетельствовать о правильном выполнении схемы.

Далее на схеме изображают щетки. Расстояние между щетками *A и B* должно быть равно $K/(2p) = 12/4 = 3$, т. е. должно соответствовать полюсному делению. Что же касается расположения щеток на коллекторе, то при этом следует руководствоваться следующим. Предположим, что электрический контакт обмотки якоря с внешней цепью осуществляется не через коллектор, а непосредственно через пазовые части обмотки, на которые наложены «условные» щетки (рис. 2.4, *а).* В этом случае наибольшая ЭДС машины соответствует положению «условных» щеток на геометрической нейтрали. Но так как коллекторные пластины смещены относительно пазовых сторон соединенных с ними секций на $0{,}5\tau$ (рис. 2.4, *б),* то, переходя к реальным щеткам, их следует расположить на коллекторе по оси главных полюсов, как это показано на рис. 2.3, *в.*

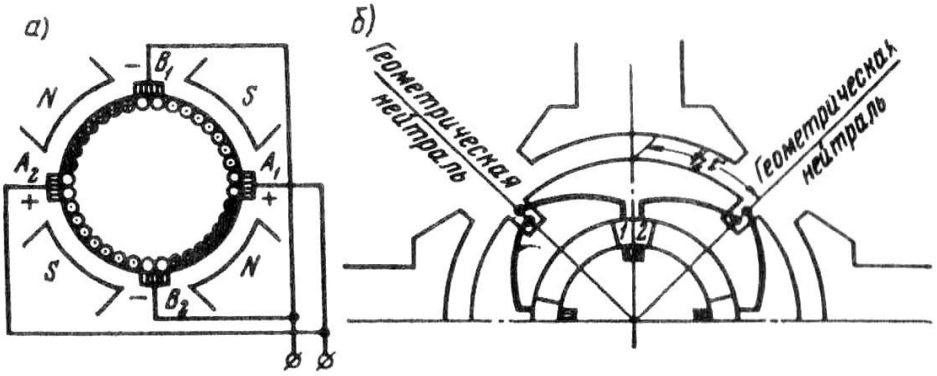


Рис. 2.4. Расположение условных (*а*) и реальных *(б)* щеток

При определении полярности щеток предполагают, что машина работает в генераторном режиме и ее якорь вращается в направлении стрелки (см. рис. 2.3, *в*). Воспользовавшись правилом «правой руки», находят направление ЭДС (тока), наведенной в секциях. В итоге получаем, что щетки A_1 и A_2, от которых ток отводится во внешнюю цепь, являются положительными, а щетки B_1 и B_2 — отрицательными. Щетки одинаковой полярности присоединяют параллельно к выводам соответствующей полярности.

Параллельные ветви обмотки якоря. Если проследить за прохождением тока в секциях обмотки якоря (см. рис. 2.3, *в*), то можно заметить, что обмотка состоит из четырех участков, соединенных параллельно друг другу и называемых *параллельными ветвями.* Каждая параллельная ветвь содержит несколько последовательно соединенных секций с одинаковым направлением тока в них. Распределение секций в параллельных ветвях показано на электрической схеме обмотки (рис. 2.5). Эту схему получают из развернутой схемы обмотки (см. рис. 2.3, *б)* следующим образом. На листе бумаги изображают щетки и имеющие с ними контакт коллекторные пластины, как это показано на рис. 2.5. Затем совершают обход секций обмотки начиная с секции *1*, которая оказывается замкнутой накоротко щеткой B_1. Далее идут секции *2* и *3,* которые образуют параллельную ветвь. Таким же образом обходят все остальные секции. В результате получаем схему с четырьмя параллельными ветвями, по две секции в каждой ветви.

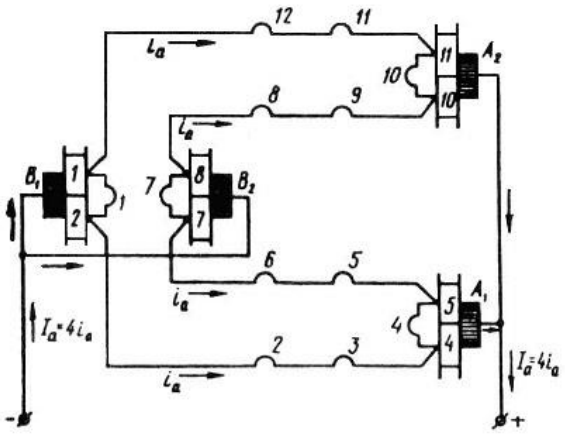


Рис. 2.5. Электрическая схема обмотки рис. 2.3, *в*.

Из полученной схемы следует, что *ЭДС обмотки якоря определяется значением ЭДС одной параллельной ветви, тогда как значение тока обмотки определяется суммой токов всех ветвей обмотки:*

$$I_a = 2ai_a, \qquad (2.5)$$

где $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря; i_a — ток одной параллельной ветви.

В простой петлевой обмотке число параллельных ветвей равно числу главных полюсов машины: $2a = 2p$.

Нетрудно заметить, что число параллельных ветвей в обмотке якоря определяет значение основных параметров машины — тока и напряжения.

Пример 2.2. Шестиполюсная машина постоянного тока имеет на якоре простую петлевую обмотку из 36 секций. Определить ЭДС и силу тока в обмотке якоря машины, если в каждой секции наводится ЭДС 10 В, а сечение провода секции рассчитано на ток не более 15 А.

Решение. Число параллельных ветвей в обмотке $2a = 2p = 6$, при этом в каждой параллельной ветви $S_n = S(2a) = 36/6 = 6$ секций. Следовательно, ЭДС обмотки якоря $E_a = 6 \cdot 10 = 60$ В, а допустимый ток машины $I_a = 6 \cdot 15 = 90$ А.

Если бы машина при прочих неизменных условиях имела восемь полюсов, то ее ЭДС уменьшилась бы до 40 В, а ток увеличился бы до 120 А.

Сложная петлевая обмотка. При необходимости получить петлевую обмотку с большим числом параллельных ветвей, как это требуется, например, низковольтных машинах постоянного тока, применяют сложную петлевую обмотку. Такая обмотка представляет собой несколько (обычно две) простых петлевых обмоток, уложенных на одном якоре и присоединенных к одному коллектору. Число параллельных ветвей в сложной петлевой обмотке $2a = 2pm$, где m — число простых петлевых обмоток, из которых составлена сложная обмотка (обычно $m = 2$). Ширина щеток при сложной петлевой обмотке принимается такой, чтобы каждая щетка одновременно перекрывала m коллекторных пластин, т. е. столько пластин, сколько простых обмоток в сложной. При этом простые обмотки оказываются присоединенными параллельно друг другу. На рис. 2.6 показана развернутая схема сложной петлевой обмотки, состоящей из двух простых ($m = 2$): $2p = 4$; $Z_э = 16$. Результирующий шаг обмотки по якорю и шаг по коллектору сложной петлевой обмотки принимают равным $y = y_к = m$. Первый частичный шаг по якорю определяют по (2.3).

Пример 2.3. Четырехполюсная машина имеет сложную петлевую обмотку якоря из 16 секций. Выполнить развернутую схему этой обмотки, приняв *m* - 2. *Решение*. Шаги обмотки: $y_1 = Z_э/(2p)$ =16/4 = 4 паза; $y = y_к$ = 2 паза; $y_2 = y_1 - y$ = 4-2 = 2 паза.

Сначала располагаем все секции одной из простых обмоток (секции с нечетными номерами: 1, 3, 5 и т. д.), а концы этих секций присоединением к нечетным пластинам коллектора (рис. 2.6). Затем располагаем на якоре секции другой петлевой обмотки с номерами 2, 4, 6 и т. д. Изображаем на схеме щетки шириной в два коллекторных деления. Число параллельных ветвей обмотки $2a = 2pm$ = 4-2 = 8.

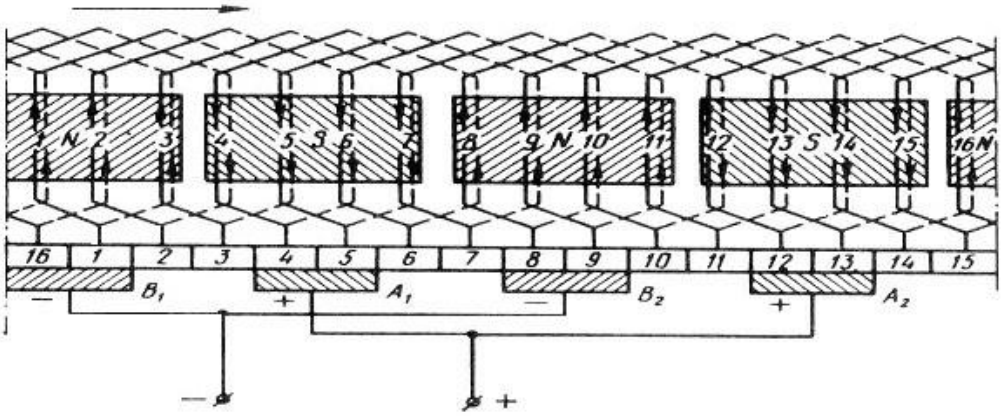


Рис. 2.6. Развернутая схема сложной петлевой обмотки

2.2. Волновые обмотки якоря

Простая волновая обмотка. Простую волновую обмотку получают при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов (рис. 2.7). Концы секций простой волновой обмотки присоединены к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстояние шага обмотки по коллектору $y_к = y$. За один обход по якорю укладывают столько секций, сколько пар полюсов имеет машина, при этом конец последней по обходу секции присоединяют к пластине, расположенной радом с исходной.

Простую волновую обмотку называют *левоходовой,* если конец последней по обходу секций присоединяется к пластине, находящейся слева от исходной (рис. 2.7, *а*). Если же эта пластина находится справа от исходной, то обмотку называют *правоходовой* (рис. 2.7, *б*). Секции волновой обмотки могут быть одновитковыми и многовитковыми. *Шаг простой волновой обмотки по коллектору*

$$y_к = y = (K \mp 1)/p \qquad (2.6)$$

Знак минус соответствует левоходовой обмотке, а знак плюс — правоходовой. Правоходовая обмотка не получила практического применения, так как ее выполнение связано с дополнительным расходом меди на перекрещивание лобовых частей.

Первый частичный шаг обмотки определяют по (2.3), а второй частичный шаг $y_2 = y - y_1$.

Пример 2.4. Четырехполюсная машина постоянного тока имеет простую волновую обмотку якоря из 13 секций. Построить развернутую схему и схему параллельных ветвей этой обмотки.

Решение. Шаги обмотки: $y_к = y = (K \mp 1)/p = (13-1)/2 = 6$ пазов; $y_1 = [Z_Э/(2p)] \mp \varepsilon = 13/4 - 0{,}25 = 3$ паза; $y_2 = y_к - y_1 = 6 - 3 = 3$ паза.

При первом обходе по якорю укладываем секции *1* и *7* (рис. 2.7, *в*). При втором обходе укладываем секции *13* и *6* и т. д., пока не будут уложены все 13 секций и обмотка не окажется

замкнутой. Секции *3, 6* и *9* в рассматриваемый момент времени замкнуты на коротко через щетки одинаковой полярности и провода, соединяющие их.

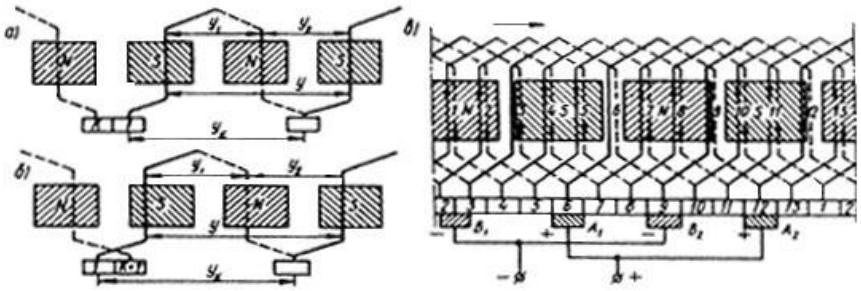


Рис. 2.7. Простая волновая обмотка: *а* — правоходовая, *б* — левоходовая; *в* — развернутая схема

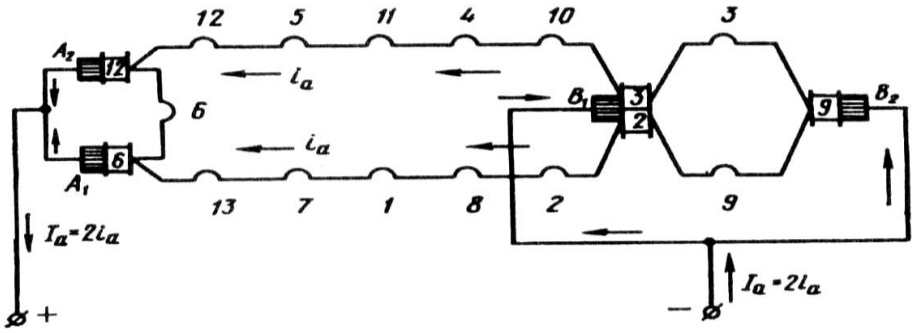


Рис. 2.8. Электрическая схема обмотки рис. 25.7, *в*

Затем определяем полярность щеток. Далее выполняем электрическую схему (схему параллельных ветвей), из которой видно (рис. 2.8), что обмотка состоит из двух параллельных ветвей ($2a = 2$). Это является характерным для простых волновых обмоток, у которых число параллельных ветвей не зависит от числа полюсов и всегда равно двум.

Из рассмотренных схем видно, что секции, входящие в одну параллельную ветвь, равномерно распределены под всеми полюсами машины. Следует также отметить, что в простой волновой обмотке можно было бы обойтись двумя щетками, например щетками B_2 и A_2. Но в этом случае нарушилась бы симметрия обмотки, и число секций в параллельных ветвях стало бы неодинаковым: в одной ветви семь секций, а в другой — шесть. Поэтому в машинах с простыми волновыми обмотками устанавливают полный комплект щеток, столько же, сколько главных полюсов, тем более что это позволяет уменьшить значение тока, приходящегося на каждую щетку, а следовательно, уменьшить размеры коллектора.

Сложная волновая обмотка (рис. 2.9). Несколько простых волновых обмоток (обычно две), уложенных на одном якоре, образуют *сложную волновую обмотку.* Число параллельных ветвей в сложной волновой обмотке $2a = 2m$ (обычно $2a = 4$), где m — число простых обмоток в сложной (обычно $m = 2$). Простые обмотки, входящие в сложную, соединяют параллельно посредством щеток. Шаг по коллектору, а следовательно, и результирующий шаг по якорю

$$y_к = y = (K \mp m)/p. \qquad (2.7)$$

Первый частичный шаг по якорю определяют по (2.3).

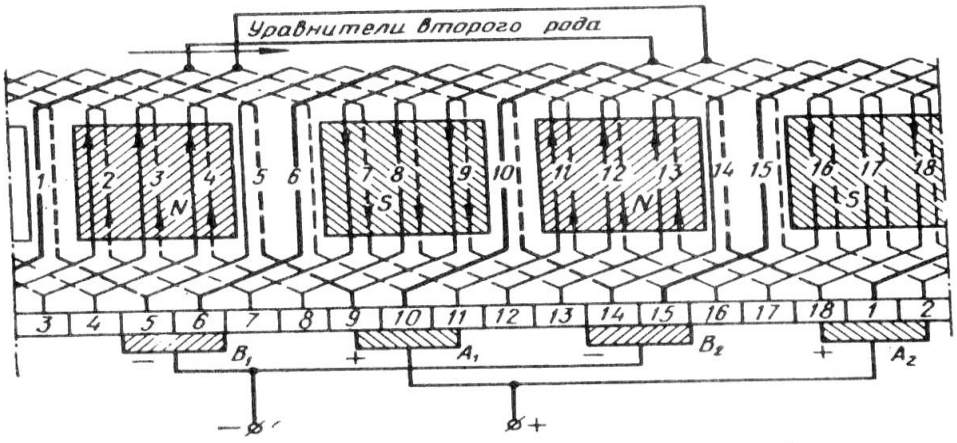


Рис. 2.9. Развернутая схема сложной волновой обмотки

Пример 2.5. Сложная волновая обмотка с $m = 2$ состоит из 18 секций. Выполнить развернутую схему этой обмотки, если $2p = 4$.

Решение. Шаги обмотки: $y_1 = [Z_Э/(2p)] \mp \varepsilon = 18/4 - 0{,}5 = 4$ паза, $y_к = y = (K \mp m)/p = (18-2)/2 = 8$ пазов; $y_2 = 8 - 4 = 4$ паза.

Порядок выполнения схемы обмотки такой же, как и при сложной петлевой обмотке: сначала укладывают в пазы якоря одну простую обмотку, состоящую из нечетных секций, а затем другую, состоящую из четных секций (рис. 2.9) Число параллельных ветвей в обмотке $2a = 4$.

2.3. Уравнительные соединения и комбинированная обмотка якоря

Условия симметрии обмотки якоря. Обмотку якоря называют *симметричной,* если ее параллельные ветви обладают одинаковыми электрическими свойствами: имеют одинаковые электрические сопротивления и в них индуцируются одинаковые ЭДС. В *несимметричной* обмотке якоря ток якоря распределяется в параллельных ветвях неодинаково, что влечет за собой перегрузку одних ветвей в недогрузку других. В результате растут электрические потери в обмотке якоря, а полезная мощность машины уменьшается.

Обмотка якоря становится симметричной лишь при соблюдении определенных условий, называемых *условиями симметрии.*

*Первое условие***.** Каждая пара параллельных ветвей обмотки должна состоять из одинакового числа секций. Это условие выполняется, если на каждую пару параллельных ветвей приходится одинаковое число секций, т. е. отношение числа секций S к числу пар параллельных ветвей a обмотки якоря равно целому числу (ц. ч.):

$$S/a = \text{ц.ч.} \qquad (2.8)$$

Нетрудно убедиться, что при несоблюдении этого условия электрическое сопротивление параллельных ветвей, а также их ЭДС становятся неодинаковыми. Это привело бы к неравномерному распределению токов в параллельных ветвях со всеми нежелательными последствиями.

Второе условие. Секции каждой пары параллельных ветвей должны занимать на якоре одинаковое число пазов:

$$Z/a = \text{ц.ч.} \qquad (2.9)$$

Третье условие. Каждая пара параллельных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение относительно системы главных полюсов, что выполнимо при

$$2p/a = \text{ц. ч.} \qquad (2.10)$$

Для сложной петлевой обмотки $2a = 2pm$. Подставляя это в (2.10), получим

$$2p/a = 2p/(pm) = 2/m = \text{ц. ч.}$$

Отсюда следует, что сложная петлевая обмотка будет симметричной только при *m = 2.*

Уравнительные соединения. Даже при соблюдении всех условий симметрии обмоток ЭДС параллельных ветвей обмотки якоря в многополюсных машинах могут оказаться неодинаковыми. Причина этого — *магнитная несимметрия,* из-за нее магнитные потоки одноименных полюсов оказываются неодинаковыми. Происходит это из-за дефектов, возникающих при изготовлении машины: наличия раковин в отливке станины, некачественной сборки полюсов, неправильной центровки якоря, т. е. его перекоса, отчего воздушный зазор под полюсами становится неодинаковым.

Влияние магнитной несимметрии на работу машины зависит от типа обмотки якоря. В волновых обмотках секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины, поэтому магнитная несимметрия не влечет за собой неравенства ЭДС в параллельных ветвях, так как она одинаково влияет на все параллельные ветви обмотки.

В петлевых обмотках якоря секции, образующие параллельную ветвь, расположены под смежной парой полюсов. Поэтому при $2p > 2$ магнитная несимметрия становится причиной неравенства ЭДС параллельных ветвей, что
ведет к появлению в обмотке якоря уравнительных токов.

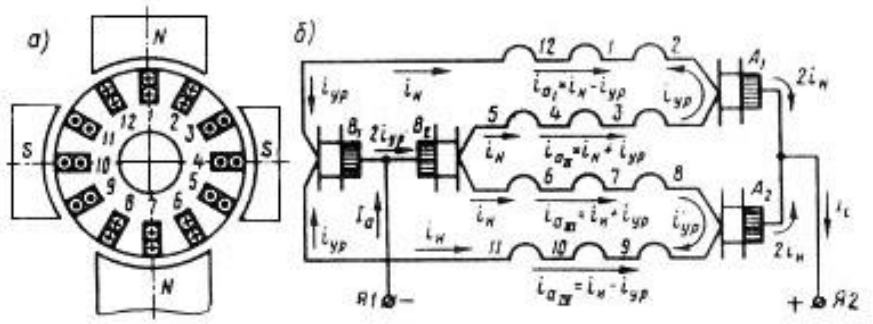


Рис. 2.10. Уравнительные токи в параллельных ветвях
простой петлевой обмотки якоря при магнитной несимметрии

Например, при неправильной центровке якоря (рис. 2.10, *а*) ЭДС первой и четвертой параллельных ветвей становятся меньше ЭДС второй и третьей ветвей (зазор под нижним полюсом меньше, чем под верхним). При этом потенциалы щеток B_1 и B_2 оказываются неодинаковыми и в параллельных ветвях обмотки появляются уравнительные токи $i_{ур}$ (рис. 2.10, *б*). Эти токи замыкаются через шину, соединяющую указанные щетки, и во внешнюю цепь машины не выходят. Следует обратить внимание, что даже при незначительной разности потенциалов u_{12} между щетками B_1 и B_2 ток $i_{ур}$ может оказаться весьма значительным, так как электрическое сопротивление параллельной ветви $r_{п.в}$ невелико. Например, при u_{12} = 2 В и $r_{п.в}$ = 0,01 Ом уравнительный ток $i_{ур} = u_{12}/(2r_{п.в}) = 2/(2 \cdot 0{,}01) = 100$ А.

Если при этом нагрузочный ток в параллельной ветви $i_{п.в}$ = 200 А, то токи в параллельных ветвях обмотки становятся неодинаковыми: $i_{aI} = i_{aIV} = i_{п.в} - i_{ур}$ = 200 -100 = 100 А; $i_{aII} = i_{aIII} = i_{п.в} + i_{ур}$ =200 + 100 = 300 А.

Неравномерная нагрузка параллельных ветвей ведет к перегреву обмотки и увеличению электрических потерь в ней. Перечисленные явления нарушают нормальную работу машины, например, перегружаются некоторые щетки (в рассматриваемом случае — щетка B_2), что вызывает интенсивное искрение на коллекторе . Для уменьшения неравномерной нагрузки

щеток в простых петлевых обмотках поступают следующим образом: точки обмотки якоря, потенциалы которых теоретически должны быть одинаковыми, электрически соединяют между собой. В этом случае возникающие в обмотке уравнительные токи замыкаются внутри обмотки без выхода на щетки.

Указанные соединения выполняют медными проводами и называют *уравнительными соединениями первого рода (уравнителями).* Практически доступными для соединения точками равного потенциала являются концы секций, присоединяемые к коллекторным пластинам, или лобовые части обмотки со стороны, обратной коллектору.

Количество точек в обмотке, имеющих одинаковый потенциал, равно числу полюсов в машине. Расстояние между двумя соседними точками равного потенциала называют *потенциальным шагом* $y_{ур}$. При расположении уравнительных соединений со стороны коллектора потенциальный шаг выражается числом коллекторных делений:

$$y_{ур} = K / a = K / p. \qquad (2.11)$$

Полное число уравнителей первого рода, которое можно установить в машине, равно

$$N_{ур} = K / a. \qquad (2.12)$$

Однако такое количество уравнительных соединений применяют только в машинах большой мощности, например в двигателях прокатных станов. В целях экономии меди и упрощения конструкции машины обычно применяют неполное число уравнителей. Например, в четырехполюсных двигателях делают 3—4 уравнительных соединения. Уравнительные соединения выполняют проводом, сечение которого составляет 25—50 % сечения провода обмотки якоря.

Пример 2.6. В машине с $2p = 4$ и простой петлевой обмоткой якоря из 12 секций необходимо установить уравнители первого рода, снабдив ими каждую вторую пластину.

Решение. Потенциальный шаг $y_{ур} = K / p = 12/2 = 6$. Полное число уравнителей $N_{ур} = y_{ур} = K / a = 12/2 = 6$.

В соответствии с условием задачи показываем на схеме $0{,}5\,N_{ур} = 3$ уравнителя, расположив их со стороны коллектора (рис. 25.11) и соединив с пластинами следующим образом: первый уравнитель соединяем с пластинами *1* и *7*, второй —с *3* и *9,* третий — с *5* и *11*.

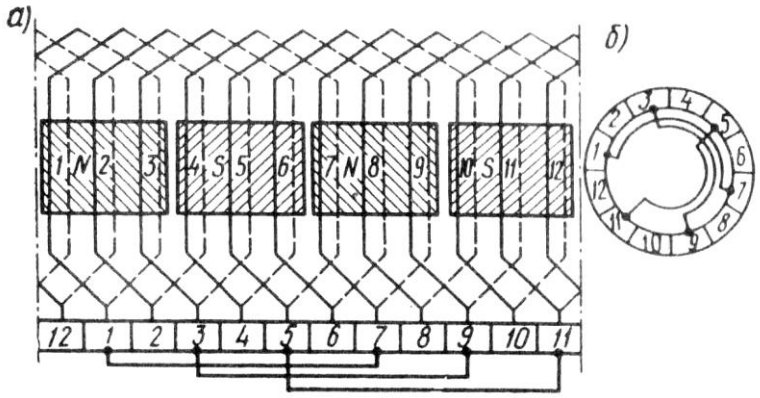


Рис. 2.11. Уравнительные соединения первого рода:
а — развернутая схема обмотки, *б* — вид со стороны коллектора

В сложных петлевых и волновых обмотках простые обмотки, образующие сложную, соединены параллельно через щеточный контакт. Но обеспечить одинаковый контакт щеток со всеми простыми обмотками практически невозможно, поэтому ток между простыми обмотками распределяется неодинаково, что нарушает равномерное распределение потенциала по коллектору и можем вызвать на нем искрение. Для устранения этого нежелательного явления применяют *уравнительные соединения (уравнители) второго рода,* с помощью которых простые обмотки, входящие в сложную, электрически соединяют между собой в точках равного потенциала. Таким образом, если уравнители первого рода устраняют нежелательные последствия магнитной несимметрии, то уравнители второго рода устраняют неравномерность в распределении потенциала по коллектору при сложных обмотках якоря.

На рис. 2.9 представлена схема сложной волновой обмотки с уравнителями второго рода, соединяющими точки равного потенциала на лобовых частях обмотки со стороны, противоположной коллектору. Эти точки отстоят друг от друга на расстоянии потенциального шага

$$y_{ур} = K / a = 18 / 2 = 9 .$$

Секцию *2* соединяют с секцией *11*, секцию *3* — с секцией *12* и т. д. (на схеме показаны лишь два уравнителя). Полное число уравнителей определяется по (25.12), но из соображения экономии меди обычно делают неполное число уравнителей второго рода.

В сложных петлевых обмотках уравнители второго рода выполняют, как показано на рис. 25.12. Ввиду того что в этой обмотке каждую секцию одной из простых обмоток присоединяют к пластинам коллектора, расположенным через одну (например, к нечетным пластинам), то пластины, находящиеся между ними (например, четные), делят напряжение каждой секции на две части. Для обеспечения равномерного распределения напряжения между пластинами необходимо, чтобы эти части были одинаковыми, т. е. чтобы напряжение между каждой парой рядом лежащих пластин (например *1* и *2*) было равно половине напряжения секции. С этой целью в обмотке применяют уравнители второго рода, с помощью которых середину секции со стороны, противоположной коллектору, соединяет с промежуточной пластиной (например, середину секции, присоединенной к пластинам *1* и 3, соединяют с пластиной *2*, как это показано на рис. 2.12). Такой уравнитель приходится «протягивать» между валом и сердечником якоря через специальное отверстие.

Таким образом, если в сложных волновых обмотках применяют лишь уравнители второго рода, то в сложных петлевых обмотках необходимы как уравнители первого, так и уравнители второго рода.

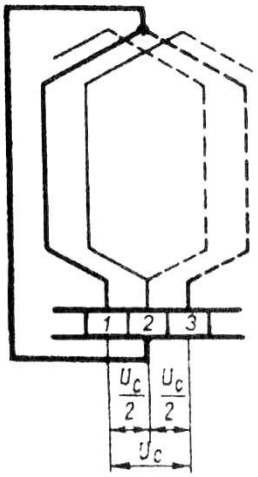


Рис. 2.12. Уравнительные соединения второго рода в сложной петлевой обмотке якоря

Комбинированная обмотка. Комбинированная (лягушачья) обмотка представляет собой сочетание петлевой и волновой обмоток, расположенных в одних пазах и присоединенных к общему коллектору. Секция этой обмотки
показана на рис. 2.13, *а.* Так как каждая из составляющих обмоток двухслойная, то комбинированную обмотку укладывают в пазах якоря в четыре слоя, а к каждой пластине коллектора припаивают по четыре проводника.

Достоинство комбинированной обмотки — большое число параллельных ветвей при отсутствии уравнительных соединений. Однако некоторая технологическая трудность в выполнении комбинированных обмоток ограничивает их применение машинами постоянного тока большой мощности, а также быстроходными машинами, в которых выполнение уравнителей затруднено.

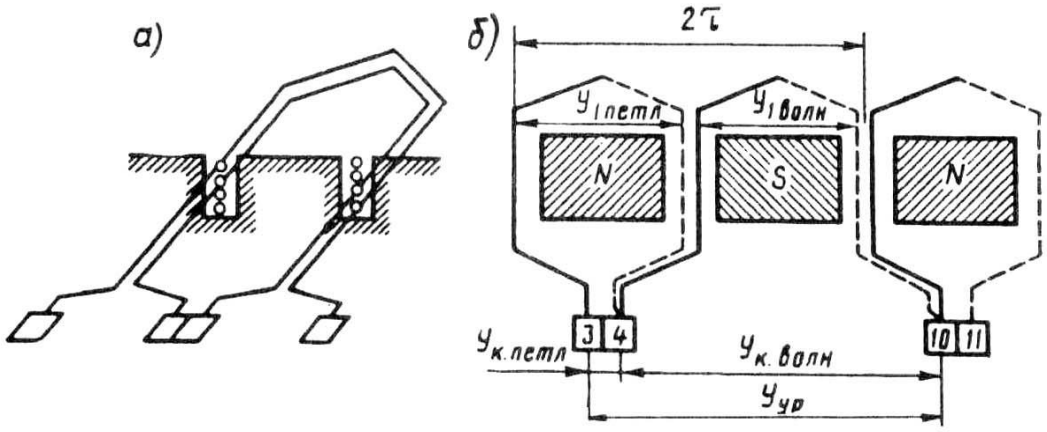


Рис. 2.13. Комбинированная обмотка якоря

На рис. 2.13, *б* показана часть развернутой схемы комбинированной обмотки. Шаги секций комбинированной обмотки принимают одинаковыми $(y_{1петл} = y_{1волн})$. Шаг по якорю комбинированной обмотки равен сумме шагов составляющих обмоток:

$$y_1 = y_{1петл} + y_{1волн} = \frac{Z_Э}{2p} + \frac{Z_Э}{2p} = \frac{Z_Э}{p} = \frac{K}{p} = y_{ур},$$

т. е. шаг *комбинированной обмотки по якорю равен потенциальному шагу* [см. (2.11)]. Поэтому пластины коллектора, которые должны быть соединены уравнителями, в комбинированной обмотке оказываются соединенными секциями.

Следует обратить внимание, что комбинированная обмотка выполнима лишь при условии равенства чисел параллельных ветвей в волновой и петлевой составляющих обмотках. При этом ЭДС параллельных ветвей обмоток должны быть одинаковыми. В петлевой обмотке число параллельных ветвей $2a = 2p$, в волновой обмотке $2a$=2. Для получения одинакового числа параллельных ветвей в обмотках волновую обмотку выполняют сложной с числом $m_{волн} = p$. Число параллельных ветвей в комбинированной обмотке $2a = 2a_{петл} + 2a_{волн} = 4a_{петл}$.

2.4. Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока

Электродвижущая сила. Она наводится в обмотке якоря основным магнитным потоком. Для получения выражения этого потока обратимся к графику распределения индукции в зазоре машины (в поперечном сечении), который при равномерном зазоре в пределах каждого полюса имеет вид криволинейной трапеции (рис. 2.14, *а,* график *1*). Заменим действительное распределение индукции в зазоре прямоугольным (график *2*), при этом высоту прямоугольника

примем равной максимальному значению индукции B_δ, а ширину — равной величине b_i, при которой площадь прямоугольника равна площади, ограниченной криволинейной трапецией. Величина b_i называется *расчетной полюсной дугой.* В машинах постоянного тока расчетная полюсная дуга мало отличается от полюсной дуги b_m*:*

$$b_i \approx b_m + 2\delta, \qquad (2.13)$$

или, воспользовавшись *коэффициентом полюсного перекрытия* $\alpha_i = b_i / \tau$, получим

$$b_i = \alpha_i \tau \qquad (2.14)$$

С учетом (2.14) основной магнитный поток (Вб)

$$\Phi = B_\delta b_i l_i \cdot 10^{-6} = B_\delta l_i \alpha_i \tau \cdot 10^{-6} \qquad (2.15)$$

Здесь τ — полюсное деление, мм; l_i — расчетная длина якоря, мм.

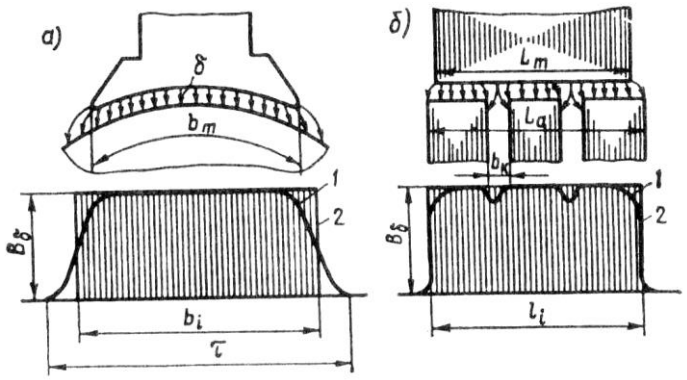


Рис. 2.14. Распределение магнитной индукции
в воздушном зазоре машины постоянного тока

Коэффициент полюсного перекрытия α_i имеет большое влияние на свойства машины постоянного тока. На первый взгляд кажется целесообразным выбрать наибольшее значение α_i, так как это способствует увеличению потока Ф, а следовательно, и увеличению мощности машины (при заданных размерах). Однако слишком большое α_i, приведет к сближению полюсных наконечников полюсов, что будет способствовать росту магнитного потока рассеяния и неблагоприятно отразится на других свойствах машины. При этом полезный поток машины может оказаться даже меньше предполагаемого значения . Обычно α_i = 0,6÷0,8, при этом меньшие значения α_i соответствуют машинам малой мощности.

На рис. 2.14, *б* показан продольный разрез главного полюса и якоря с радиальными вентиляционными каналами. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по продольному разрезу машины имеет вид зубчатой кривой (кривая *1*). Заменим эту кривую прямоугольником высотой B_δ и основанием l_i, величина которого такова, что площадь прямоугольника равна площади, ограниченной зубчатой кривой. Это основание представляет собой *расчетную длину якоря* (мм)

$$l_i = 0{,}5(l_m + l), \qquad (2.16)$$

где l_m — длина полюса, мм;

$$l = l_a - n_k b_k \qquad (2.17)$$

— длина якоря без радиальных вентиляционных каналов, мм; l_a — общая длина якоря, включая вентиляционные каналы, мм; b_k — ширина вентиляционного канала (обычно 10 мм), мм.

При выводе формулы ЭДС будем исходить из прямоугольного закона распределения индукции в зазоре, при этом магнитная индукция на участке расчетной полюсной дуги $b_i = \alpha_i \tau$ равна B_δ, а за ее пределами равна нулю и в проводниках, расположенных за пределами b_i, ЭДС не наводится. Это эквивалентно уменьшению общего числа пазовых проводников в обмотке якоря до значения $N_i = \alpha_i N$. Исходя из этого и учитывая, что ЭДС обмотки определяем с суммой ЭДС секций, входящих лишь в одну параллельную ветвь с числом пазовых проводников $N/(2a)$, запишем

$$E_a = E_{np}\left[N/(2a)\right]\alpha_i, \qquad (2.18)$$

где

$$E_{np} = B_\delta l_i v \qquad (2.19)$$

— ЭДС одного пазового проводника обмотки, активная длина которого l_i.

Окружную скорость вращающегося якоря (м/с) заменим частотой вращения (об/мин): $v = \pi D_a n/60 = 2p\tau n/60$, где $\pi D_a = 2p\tau$.

С учетом (25.18), (25.19) получим

$$E_a = B_\delta l_i \tau \alpha_i \frac{2pn}{60}\frac{N}{2a}$$

или, учитывая, что произведение $B_\delta l_i \tau \alpha_i = \Phi$, получим выражение ЭДС машины постоянного тока (В):

$$E_a = \frac{pN}{60a}\Phi n = c_e \Phi n, \qquad (2.20)$$

где

$$c_e = pN/(60a) \qquad (2.21)$$

— постоянная для данной машины величина; Ф — основной магнитный поток, Вб; n — частота вращения якоря, об/мин.

Значение ЭДС обмотки якоря зависит от ширины секции y_1. Наибольшее значение ЭДС соответствует полному (диаметральному) шагу $y_1 = \tau$, так как в этом случае с каждой секцией обмотки сцепляется весь основной магнитный поток Ф. Если же секция укорочена ($y < \tau$), то каждая секция сцепляется лишь с частью основного потока, а поэтому ЭДС обмотки якоря уменьшается. Таков же эффект при удлиненном шаге секций ($y > \tau$), так как в этом случае каждая секция обмотки сцепляется с основным потоком одной пары полюсов и частично с потоком соседней пары, имеющим противоположное направление, так что результирующий поток, сцепленный с каждой секцией, становится меньше потока одной пары полюсов. По этой причине в машинах постоянного тока практическое применение получили секции с полным или укороченным шагом.

На ЭДС машины влияет положение щеток: при нахождении щеток на геометрической нейтрали ЭДС наибольшая, так как в этом случае в каждой параллельной ветви обмотки все секции имеют одинаковое направление ЭДС; если же щетки сместить с нейтрали, то в параллельных ветвях окажутся секции с противоположным направлением ЭДС, в результате ЭДС обмотки якоря будет уменьшена.

При достаточно большом числе коллекторных пластин уменьшения ЭДС машины при сдвиге щеток с нейтрали учитывается множителем $\cos\beta$:

$$E_a = c_e \Phi n \cos\beta, \qquad (2.22)$$

где β — угол смещения оси щеток относительно нейтрали (рис. 2. 15).

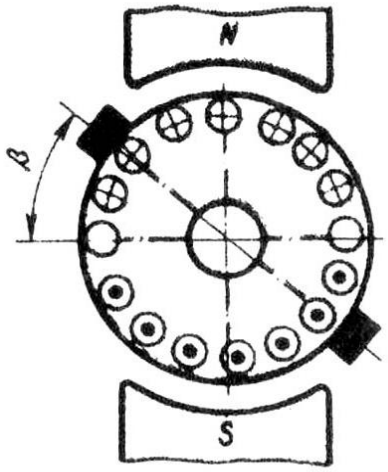


Рис. 2.15. Наведение ЭДС в обмотке якоря при сдвиге
щеток с геометрической нейтрали на угол β

Электромагнитный момент. При прохождении по пазовым проводникам обмотки якоря тока i_a на каждом из проводников появляется электромагнитная сила

$$F_{ЭМ} = B_\delta l_i i_a . \qquad (2.23)$$

Совокупность всех электромагнитных сил $F_{ЭМ}$ на якоре, действующих на плечо, равное радиусу сердечника якоря $(D_a / 2)$, создает на якоре электромагнитный момент *M.*

Исходя из прямоугольного закона распределения магнитной индукции в зазоре (см. рис. 2.14, *а,* график *2*), следует считать, что сила $F_{ЭМ}$ одновременно действует на число пазовых проводников $N_i = \alpha_i N$. Следовательно, электромагнитный момент машины постоянного тока (Н·м)

$$M = F_{ЭМ} \alpha_i N (D_a / 2)$$

Учитывая, что $F_{ЭМ} = B_\delta l_i i_a$, а также что ток параллельной ветви $i_a = I_a /(2a)$, получим

$$M = B_\delta l_i \left[I_a /(2a) \right] \alpha_i N (D_a / 2) .$$

Используя выражение основного магнитного потока (25.15), а также имея в виду, что $D_a = 2p\tau / \pi$, получим выражение электромагнитного момента (Н·м):

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = c_M \Phi I_a , \qquad (2.24)$$

где I_a — ток якоря, А;

$$c_M = pN /(2\pi\alpha) \qquad (2.25)$$

— величина, постоянная для данной машины.

Электромагнитный момент машины при ее работе в двигательном режиме является вращающим, а при генераторном режиме — тормозящим по отношению к вращающему моменту приводного двигателя.

Подставив из (25.20) в (25.24) выражение основного магнитного потока $\Phi = E_a /(c_e n)$, получим еще одно выражение электромагнитного момента:

$$M = \left[60 /(2\pi n) \right] E_a I_a = 9{,}55 P_{ЭМ} / n = P_{ЭМ} / \omega , \qquad (2.26)$$

где $\omega = 2\pi n / 60$ — угловая скорость вращения;

$$P_{ЭМ} = E_a I_a \qquad (2.27)$$

— *электромагнитная мощность машины постоянного тока,* Вт.

Из (2.26) следует, что в машинах равной мощности электромагнитный момент больше у машины с меньшей частотой вращения якоря.

2.5. Выбор типа обмотки якоря

Применение в машине постоянного тока того или иного типа обмотки якоря определяется технико-экономическими требованиями. Выбранный тип обмотки должен обеспечивать в машине необходимую ЭДС при заданном токе. При этом следует стремиться к минимальному числу уравнительных соединений. Требования экономического характера при выборе типа обмотки сводятся к возможно лучшему использованию пазов сердечника якоря, что определяется значением коэффициента заполнения паза медью.

Выбранный тип обмотки должен содержать возможно меньшее число пазовых проводников N, так как в противном случае значительная часть площади паза будет занята изоляцией этих проводников. Преобразуя выражения (2.20), получим

$$N = 60aE_a /(p\Phi n). \qquad (2.28)$$

Отсюда следует, что при заданных E_a, p, Φ и n число проводников в обмотке прямо пропорционально числу пар параллельных ветвей. Поэтому *при выборе типа обмотки следует отдавать предпочтение обмоткам якоря с минимальным числом параллельных ветвей,* например, простой волновой обмотке с $2a = 2$, которая к тому же не требует уравнительных соединений. В табл. 2.1 приведены рекомендации по выбору типа обмотки якоря для двигателей постоянного тока общепромышленного назначения в зависимости от числа полюсов и силы тока якоря.

Таблица 2.1

Число полюсов $2p$	Ток якоря, I_a, А	Тип обмотки якоря
2	—	Простая петлевая
4	До 700	» волновая
4	Свыше 700 до 1400	» петлевая или комбинированная
4	Свыше 1400	Сложная петлевая ($m = 2$) или комбинированная

К условиям, ограничивающим применение простой волновой обмотки, следует отнести в первую очередь предельно допустимое значение тока в параллельной ветви (300—400 А) и среднее значение напряжения между смежными коллекторными пластинами $U_{к.ср} = 2pU / K$, которое не должно превышать (В):

Машины мощностью до 1 кВт	25—30
Машины мощностью более 1 кВт без компенсационной обмотки	16

Указанные предельные значения $U_{к.ср}$ распространяются и на обмотки якоря других типов. При превышении указанных пределов появляется вероятность возникновения в машине опасного явления, называемого круговым огнем .

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие обмоток якоря от обмоток статора бесколлекторных машин переменного тока?
2. Какими параметрами характеризуется обмотка якоря?
3. Сколько параллельных ветвей имеет обмотка якоря шестиполюсной машины в случаях простой петлевой и простой волновой обмоток?
4. Во сколько раз изменится ЭДС обмотки якоря шестиполюсной машины, если простую волновую обмотку заменить простой петлевой при том же числе секций?
5. Что такое магнитная несимметрия и каковы ее последствия?
6. В каких обмотках якоря применяют уравнители первого и второго рода?
7. Каковы достоинства комбинированной обмотки?
8. Как влияют ширина секции и положение щеток на ЭДС машины?
9. Какими соображениями руководствуются при выборе типа обмотки якоря?

Глава Ш. Магнитная цепь машины постоянного тока

3.1.Магнитное поле четырехполюсной машины

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

На рис. 3.1 показана картина магнитного поля четырехполюсной машины. При этом имеется в виду машина, работающая в режиме х.х., когда МДС создается лишь обмоткой возбуждения, а в обмотке якоря и обмотке добавочных полюсов тока нет или он настолько мал, что его влиянием на картину магнитного поля можно пренебречь. В целях упрощения на рисунке не показаны добавочные полюсы, так как в режиме х.х. их влияние на картину магнитного поля машины незначительно. Как это следует из рис. 3.1, магнитный поток главных полюсов состоит из двух неравных частей: большая часть образует основной магнитный поток Φ, а меньшая — магнитный поток рассеяния полюсов Φ_σ. Поток рассеяния учитывается коэффициентом рассеяния σ_m.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме х.х. определяется суммой магнитных напряжений на участках магнитной цепи (рис. 26.2):

$$F_{BO} = \sum F = 2F_\delta + 2F_Z + 2F_m + F_a + F_Я, \qquad (3.1)$$

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

Если машина имеет компенсационную обмотку , то в (3.1) следует ввести еще одно слагаемое F_{Zm}, представляющее собой магнитное напряжение зубцового слоя главного полюса.

Порядок расчета магнитных напряжений на участках магнитной цепи машины постоянного тока в принципе такой же, что и в случае асинхронной машины (см. гл. 11). При этом расчет магнитных напряжений станины и сердечника главного полюса ведут по магнитному потоку главного полюса Φ_m, который больше основного потока Φ на значение потока рассеяния Φ_σ:

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

где $\sigma_m \approx 10\delta/\tau = 0{,}10 \div 0{,}25$ — коэффициент магнитного рассеяния.

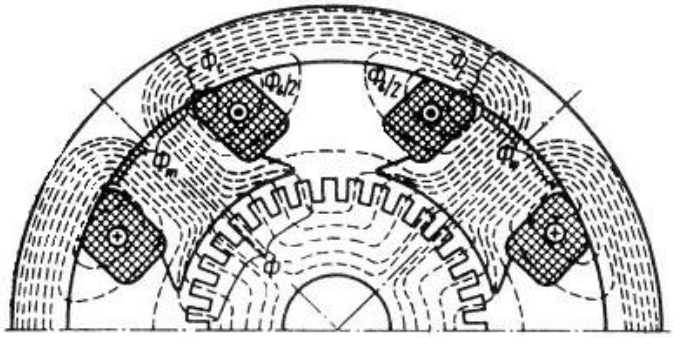


Рис. 3.1. Магнитное поле машины постоянного тока в режиме х.х.

При заданном значении ЭДС машины E_a определяют требуемое значение основного магнитного потока (Вб) [см. (25.20)]: $\Phi = \dfrac{60aE_a}{pNn}$.

(3.2)

Далее рассчитывают магнитную индукцию для каждого участка магнитной цепи:

$$B_x = \Phi_x / S_x, \qquad (3.3)$$

где Φ_x — магнитный поток на данном участке магнитной цепи. Вб;

S_x — площадь поперечного сечении этого участка, м^2.

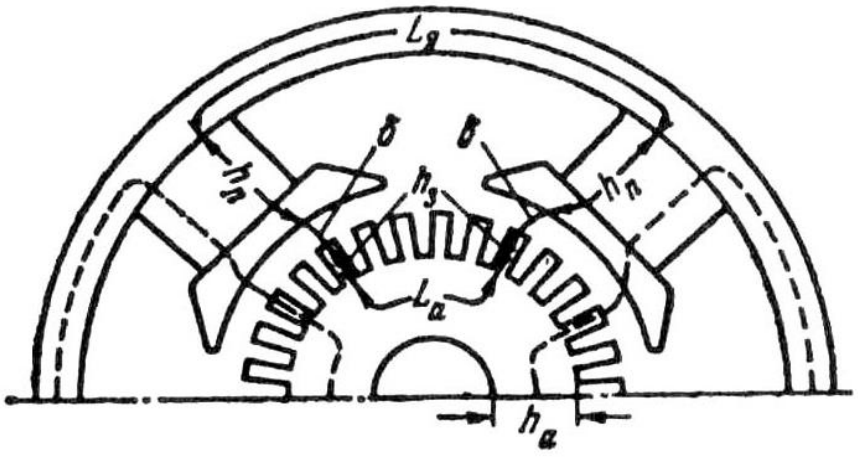


Рис. 3.2. Расчетный участок магнитной цепи четырехполюсной машины постоянного тока

По таблицам или кривым намагничивания для соответствующих ферромагнитных материалов находят напряженность магнитного поля на участках магнитной цепи H_x, а затем определяют магнитное напряжение (А)

$$F_x = H_x l_x$$

и МДС обмотки возбуждения на пару полюсов по (3.1).

Значения магнитных напряжений для различных участком магнитной цепи неодинаковы и зависят от магнитных сопротивлений этих участков. Наибольшим магнитным сопротивлением

обладает воздушный зазор, поэтому магнитное напряжение F_δ намного больше любого из слагаемых выражения (3.1).

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

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

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

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

Магнитное напряжение воздушного зазора (А)

$$F_\delta = 0{,}8 B_\delta \delta k_\delta \cdot 10^3, \qquad (3.4)$$

где δ — величина воздушного зазора, мм; k_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления зазора из-за зубчатости якоря ($k_\delta > 1$).

Магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ (Тл) пропорциональна основному магнитному потоку Φ. В машинах постоянного тока общего назначения $B_\delta = 0{,}6 \div 1{,}0$ Тл (большие значения B_δ соответствуют более крупным машинам).

Обычно расчет МДС $\sum F$ ведут для ряда значений магнитного потока ($0{,}5\Phi_{ном}, 0{,}75\Phi_{ном}, \Phi_{ном}$ и $1{,}2\Phi_{ном}$), а затем строят магнитную характеристику машины $\Phi_* = f(\sum F_*)$, где $\Phi_* = \Phi / \Phi_{ном}$ — относительное значение магнитного потока; $\sum F_* = \sum F / \sum F_{ном}$ — относительное значение МДС обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме х.х.; $\Phi_{ном}$ и $\sum F_{ном}$ — номинальные значения магнитного потока и МДС в режиме х.х., соответствующие номинальному значению ЭДС E_a. В начальной части магнитная характеристика прямолинейна (рис. 3.3). Объясняется это тем, что при небольших значениях $\sum F_*$ магнитная цепь не насыщена и МДС возбуждения определяется, в основном, магнитным напряжением воздушного зазора $\sum F = 2F_\delta$.

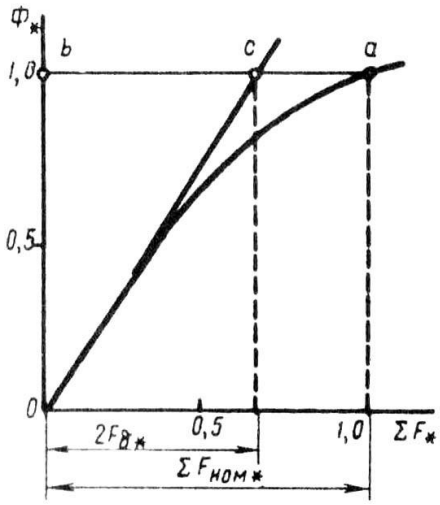


Рис. 3.3 Магнитная характеристика

Затем с ростом $\sum F_*$ наступает насыщение магнитной цепи и магнитная характеристика становится криволинейной. Коэффициент насыщения магнитной цепи машины

$$k_\mu = \sum F_{ном*} / (2F_{\delta*}) = ba / bc = 1/(2F_{\delta*}). \qquad (3.5)$$

Для машин постоянного тока $k_\mu = 1{,}2 \div 1{,}7$.

3.2. Реакция якоря машины постоянного тока

При работе машины в режиме х.х. ток в обмотке якоря практически отсутствует, а поэтому в машине действует лишь МДС обмотки возбуждения F_{B0}. Магнитное поле машины в этом случае симметрично относительно оси полюсов (рис. 3.4, *а*). График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой кривую, близкую к трапеции.

Если же машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток, который создаст в магнитной системе машины МДС якоря F_a. Допустим, что МДС возбуждения равна нулю и в машине действует лишь МДС якоря. Тогда магнитное поле, созданное этой МДС, будет иметь вид, представленный на рис. 3.4, *б.* Из этого рисунка видно, что МДС обмотки якоря направлена по линии щеток (в данном случае по геометрической нейтрали). Несмотря на то, что якорь вращается, пространственное положение МДС обмотки якоря остается неизменным, так как направление этой МДС определяется положением щеток.

Наибольшее значение МДС якоря — на линии щеток (рис. 3.4, *б,* кривая *1*), а по оси полюсов эта МДС равна нулю. Однако распределение магнитной индукции в зазоре от потока якоря совпадает с графиком МДС лишь в пределах полюсных наконечников. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабляется (рис. 26.4, *б,* кривая *2*). Объясняется это увеличением магнитного сопротивления потоку якоря в межполюсном пространстве. МДС обмотки якоря на пару полюсов пропорциональна числу проводников в обмотке *N* и току якоря I_a:

$$F_a = NI_a / (4ap). \qquad (3.6)$$

Введем понятие *линейной нагрузки* (А/м), представляющей собой суммарный ток якоря, приходящийся на единицу длины его окружности по наружному диаметру якоря D_a:

$$A = Ni_a / (\pi D_a), \qquad (3.7)$$

где $i_a = I_a/(2a)$ — ток одного проводника обмотки, А.

Значение линейной нагрузки для машин постоянного тока общего назначения в зависимости от их мощности может быть $(100 \div 500) \cdot 10^2$ А/м. Воспользовавшись линейной нагрузкой, запишем выражение для МДС якоря: $F_a = A\tau$. Таким образом, в нагруженной машине постоянного тока действуют две МДС: возбуждения F_{B0} и якоря F_a.

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют *реакцией якоря.* Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов.

На рис. 3.4, *в* показано распределение магнитных силовых линий результирующего поля машины, работающей в генераторном режиме при вращении якоря по часовой стрелке. Такое же распределение магнитных линий соответствует работе машины в режиме двигателя, но при вращении якоря против часовой стрелки. Если принять, что магнитная система машины *не насыщена,* то реакция якоря будет лишь искажать результирующий магнитный поток, не изменяя его значения: край полюса и находящийся под ним зубцовый слой якоря, где МДС якоря совпадает по направлению с МДС возбуждения, *подмагничиваются;* другой край полюса и зубцовый слой якоря, где МДС направлена против МДС возбуждения, *размагничиваются.* При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль mm' (линия, проходящая через точки на якоре, в которых индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали nn' на угол α. Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение результирующего поля, а следовательно, тем больше угол смещения физической нейтрали. *При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а при работе двигателем — против вращения якоря.*

Искажение результирующего поля машины неблагоприятно отражается на ее рабочих свойствах. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы щеточного контакта и может послужить причиной усиления искрения на коллекторе. Во-вторых, искажение результирующего поля машины влечет за собой перераспределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины. На рис. 3.4, *в* показан график распределения результирующего поля в зазоре, полученный совмещением кривых, изображенных на рис. 23.4, *а, б.* Из этого графика следует, что магнитная индукция в зазоре машины распределяется несимметрично относительно оси полюсов, резко увеличиваясь под подмагниченными краями полюсов. Это приводит к тому, что мгновенные значения ЭДС секций обмотки якоря в моменты попадания их пазовых сторон в зоны максимальных значений магнитной индукции (под подмагниченные края полюсных наконечников) резко повышаются. В результате возрастает напряжение между смежными коллекторными пластинами $U_к$. При значительных нагрузках машины напряжение $U_к$ можем превзойти допустимые пределы и миканитовая прокладка между смежными пластинами будет перекрыта электрической дугой. Имеющиеся на коллекторе частицы графита будут способствовать развитию электрической дуги, что приведет к возникновению мощной электрической дуги, перекрывающей весь коллектор или значительную его часть, — явления чрезвычайно опасного.

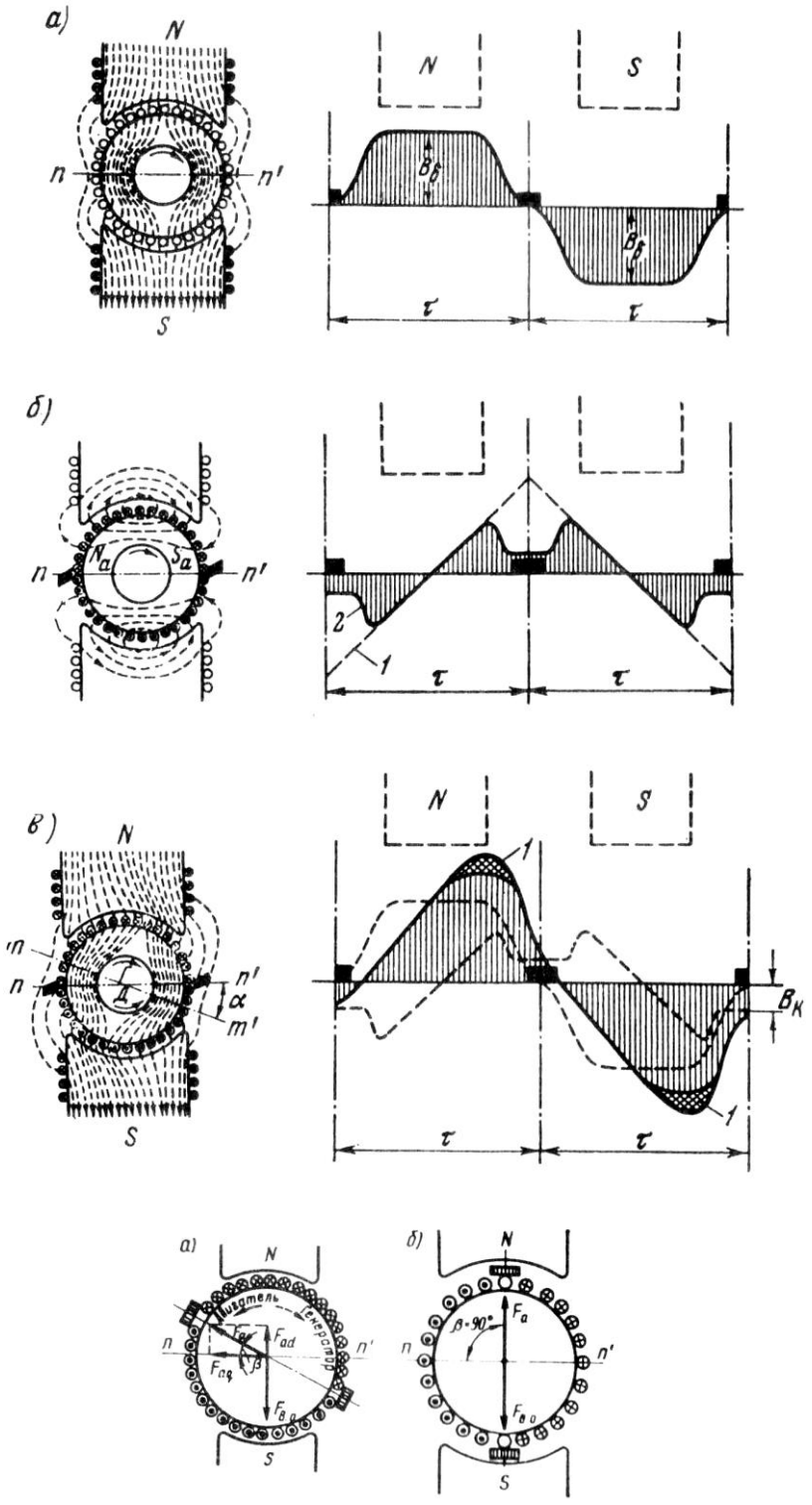


Рис. 3.5. Разложение МДС обмотки якоря на продольную и поперечную составляющие

Таковы последствия влияния реакции якоря на машину с ненасыщенной магнитной системой. Если же магнитная система машины *насыщена*, что имеет место у большинства электрических машин, то подмагничивание одного края полюсного наконечника и находящегося под ним зубцового слоя якоря происходит в меньшей степени, чем размагничивание другого края и находящегося под ним зубцового слоя якоря. Это благоприятно сказывается на распределении магнитной индукции в зазоре, которое становится более равномерным, так как максимальное значение индукции под подмагничиваемым краем полюсного наконечника уменьшается на величину, определяемую высотой участка *1* на рис. 3.4, *в*. Однако результирующий магнитный

поток машины при этом уменьшается. Таким образом, реакция якоря в машине с насыщенной магнитной системой размагничивает машину (так же как и у синхронной машины при активной нагрузке). В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генераторов снижается ЭДС, у двигателей уменьшается вращающий момент.

Влияние реакции якоря на работу машины усиливается при *смещении щеток с геометрической нейтрали.* Объясняется это тем, что вместе со щетками смещается и вектор МДС якоря (рис. 3.5, *а*). При этом МДС якоря F_a помимо поперечной составляющей $F_{aq} = F_a \cos\beta$ приобретает и продольную составляющую $F_{ad} = F_a \sin\beta$, направленную по оси полюсов. Если машина работает *в генераторном режиме*, то при смещении щеток в направлении вращения якоря продольная составляющая МДС якоря действует встречно МДС обмотки возбуждения F_{B0}, что ослабляет основной магнитный поток машины; при смещении щеток против вращения якоря продольная составляющая МДС якоря F_{ad} действует согласованно с МДС F_{B0},что вызывает некоторое подмагничивание машины и может явиться причиной искрения на коллекторе. Если машина работает в *двигательном режиме*, то при смещении щеток по направлению вращения якоря продольная составляющая МДС якоря F_{ad} подмагничивает машину, а при смещении щеток против вращения якоря продольная составляющая F_{ad} размагничивает машину. При дальнейшем рассмотрении вопросов, связанных с действием продольной составляющей МДС якоря, будем иметь в виду лишь ее размагничивающее действие, так как подмагничивающее действие F_{ad} в машинах постоянного тока общего назначения недопустимо из-за нарушения работы щеточного контакта.

Следует обратить внимание на то, что смещение щеток с геометрической нейтрали влияет и на поперечную составляющую МДС якоря — величину, зависящую от угла β, с ростом которого она уменьшается $(F_{aq} = F_a \cos\beta)$. Таким образом, в коллекторных машинах возможны два случая: 1) щетки установлены на геометрической нейтрали и реакция якоря является только поперечной; 2) щетки смещены с геометрической нейтрали и реакция якоря имеет две составляющие — поперечную и продольную (размагничивающую). Принципиально также возможен случай, когда реакция якоря по поперечной оси отсутствует. Это имеет место, когда щетки расположены по оси, перпендикулярной геометрической нейтрали, т. е. когда $\beta = 90^0$ (рис. 3.5, *б*). Однако такой случай не имеет практического применения, так как машина становится неработоспособной: в генераторном режиме ЭДС машины равна нулю, так как в параллельную ветвь обмотки входит равное число секций со встречным направлением ЭДС, а в двигательном режиме электромагнитные силы активных сторон обмотки якоря, действующие слева и справа от оси щеток, равны и противоположно направлены, а поэтому вращающего момента не создают.

3.3. Учет размагничивающего влияния реакции якоря

Размагничивающее влияние реакции якоря при нагрузке машины постоянного тока учитывают при расчете числа витков полюсных катушек возбуждения. С этой целью при расчете числа витков такой катушки $w_{к.в}$, используют значение МДС обмотки возбуждения $F_{в.н}$, соответствующее номинальной нагрузке машины:

$$w_{к.в} = F_{в.н} / (2I_B), \qquad (3.8)$$

где I_B — ток в обмотке возбуждения, А.

Значение МДС обмотки возбуждения на пару полюсов $F_{в.н}$ должно быть таким, чтобы ЭДС якоря E_a при работе машины с номинальной нагрузкой была такой же, что и в режиме холостого хода, когда МДС возбуждения $F_{B0} = \sum F_{ном}$ [см. (3.1)].

В современных машинах постоянного тока щетки устанавливают на геометрической нейтрали. В этом случае МДС обмотки возбуждения при нагрузке машины:

$$F_{в.н} = F_{B0} + F_{qd}\,. \qquad (3.9)$$

Здесь F_{qd} представляет собой *приращение МДС обмотки возбуждения, компенсирующее размагничивающее влияние реакции якоря по поперечной оси на пару полюсов* (А).

Количественный учет размагничивающего действия реакции якоря усложнен тем, что МДС поперечной реакции якоря действует перпендикулярно оси главных полюсов и вызывает искажение магнитного потока обмотки возбуждения. Возникающее при этом размагничивание машины происходит из-за магнитного насыщения элементов магнитной цепи машины, в первую очередь зубцов сердечника якоря.

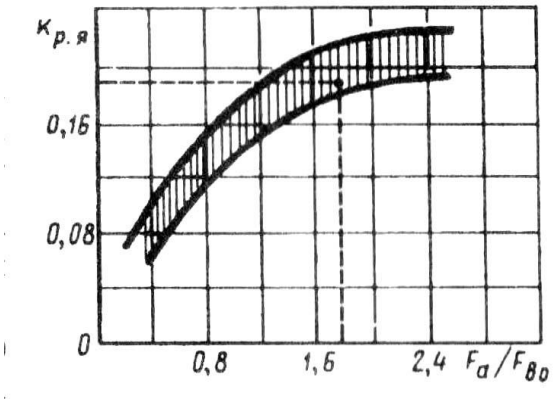


Рис. 3.6. График $k_{р.я} = f(F_a / F_{B0})$

Размагничивающее действие реакции якоря по поперечной оси учитывают введением коэффициента реакции якоря $k_{р.я}$. Этот коэффициент получен в результате исследования большого количества некомпенсированных машин постоянного тока при различных значениях магнитной индукции в зубцах якоря B_Z.

Приращение МДС, компенсирующее реакцию якоря по поперечной оси (А),

$$F_{qd} = k_{р.я} F_a, \qquad (3.10)$$

где F_a — МДС обмотки якоря на пару полюсов (26.6), А.

Для большинства машин постоянного тока магнитная индукция в зубцах якоря $B_Z = 1{,}7 \div 2{,}3$ Тл. Приращение МДС F_{qd} определяют по графику $k_{р.я} = f(F_a / F_{B0})$ (рис. 26.6), где нижняя граница графика соответствует B_Z = 1,7 Тл, а верхняя — B_Z = 2,3 Тл.

Значение тока в обмотке возбуждения [см. (3.8)] принимают в зависимости от вида возбуждения машины постоянного тока: при параллельном возбуждении при мощности машин от 10 до 1000 кВт ток I_B принимают соответственно от 4,0 до 1,0% от номинального тока машины, а в машинах мощностью от 1 до 10 кВт -соответственно от 8,0 до 4,0%; в машинах последовательного возбуждения ток возбуждения принимают равным току якоря.

В машинах постоянного тока с компенсационной обмоткой $F_{qd} = 0$, т. е. расчет числа витков полюсной катушки (3.8) ведут по величине $F_{B0} = \sum F_{ном}$.

Пример 3.1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения мощностью $P_{ном} = 75$ кВт работает от сети напряжением U = 220 В. КПД двигателя при номинальной нагрузке $\eta_{ном}$= 0,89. Двигатель четырехполюсный, обмотка якоря простая волновая ($2a$ = 2),

число эффективных проводников в обмотке N = 164, ток возбуждения составляет 1,3% от номинального потребляемого двигателем тока. Определить число витков в полюсной катушке возбуждения $w_{к.в}$, если все они соединены последовательно, воздушный зазор δ=2,0 мм, коэффициент воздушного зазора k_δ = 1,3, магнитная индукция в зазоре B_δ = 0,76 Тл, в зубцах якоря B_Z = 1,8 Тл, а коэффициент насыщения магнитной цепи машины k_μ =1,35.

Решение. Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке.

$$I_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{U \cdot \eta_{ном}} = \frac{75 \cdot 10^3}{220 \cdot 0{,}89} = 383\,\text{А}.$$

Ток в обмотке возбуждения

$$I_B = 0{,}013 I_{ном} = 0{,}013 \cdot 383 = 5\,\text{А}.$$

Ток в обмотке якоря

$$I_a = I_{ном} - I_B = 383 - 5 = 378\,\text{А}.$$

Магнитное напряжение воздушного зазора по (26.4)

$$F_\delta = 0{,}8 B_\delta \delta k_\delta \cdot 10^3 = 0{,}8 \cdot 0{,}76 \cdot 2{,}0 \cdot 1{,}3 \cdot 10^3 = 1580\,\text{А}.$$

МДС возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{B.0} = 2 F_\delta k_\mu = 2 \cdot 1580 \cdot 1{,}35 = 4266\,\text{А}.$$

МДС обмотки якоря на пару полюсов по (26.6)

$$F_a = N I_a / (4ap) = 164 \cdot 378 / (4 \cdot 1 \cdot 2) = 7749\ \text{А}.$$

Коэффициент реакции якоря по рис. 26.6 при $F_a / F_{B0} = 7749 / 4266 = 1{,}8$ и $B_Z = 1{,}8$ Тл равен $k_{р.я}$ = 0,19.

Приращение МДС, компенсирующее реакцию якоря по поперечной оси, по (3.10)

$$F_{qd} = k_{р.я} F_a = 0{,}19 \cdot 7749 = 1472\ \text{А}.$$

МДС возбуждения при номинальной нагрузке двигателя по (3.9)

$$F_{в.н} = F_{B0} + F_{qd} = 4266 + 1472 = 5738\ \text{А}.$$

Число витков в полюсной катушке возбуждения по (26.8)

$$w_{к.в} = F_{в.н} / (2 I_B) = 5738 / (2 \cdot 5) = 574$$

3.4. Устранение вредного влияния реакции якоря

В связи с тем что реакция якоря неблагоприятно влияет на рабочие свойства машины постоянного тока [1], при проектировании машины принимают меры к устранению реакции якоря или хотя бы к ослаблению ее влияния до допустимых пределов.

Компенсационная обмотка. Наиболее эффективным средством подавления влияния реакции якоря по поперечной оси является применение в машине компенсационной обмотки. Эту обмотку укладывают в пазы полюсных наконечников (рис. 3.7) и включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы МДС компенсационной обмотки F_k была противоположна по направлению МДС обмотки якоря F_a. Компенсационную обмотку делают распределенной по поверхности полюсного наконечника всех главных полюсов машины. При этом линейную нагрузку для компенсационной обмотки принимают равной линейной нагрузке обмотки якоря.

Включение компенсационной обмотки последовательно в цепь якоря обеспечивает автоматичность компенсации МДС якоря при любой (в пределах номинальной) нагрузке машины. Таким образом, в машине постоянного тока с компенсационной обмоткой при переходе от холостого хода к режиму нагрузки закон распределения магнитной индукции в зазоре главных полюсов остается практически неизменным. Однако в межполюсном пространстве часть МДС якоря остается нескомпенсированной. Нежелательное влияние этой МДС на работу щеточного контакта устраняют применением в машине добавочных полюсов.

Компенсационные обмотки применяют лишь в машинах средней и большой мощности — более 150—500 кВт при U > 440 В, работающих с резкими колебаниями нагрузки, например в двигателях для прокатных станов. Объясняется это тем, что компенсационная обмотка удорожает и усложняет машину и ее применение в некоторых случаях экономически не оправдывается.

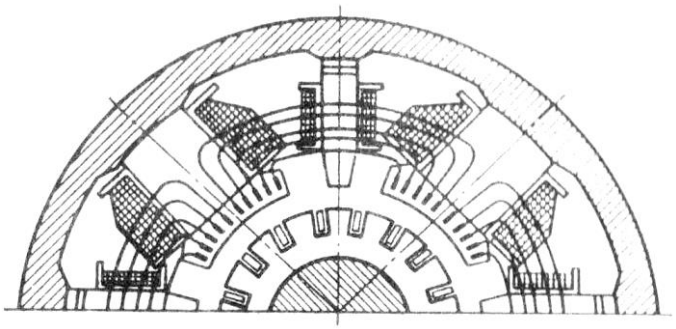


Рис. 3.7. Компенсационная обмотка

Увеличение воздушного зазора под главными полюсами. В машинах малой и средней мощности, не имеющих компенсационной обмотки, вредное влияние реакции якоря по поперечной оси ослабляют соответствующим выбором воздушного зазора под главными полюсами. При этом следует иметь в виду, что при достаточно малом воздушном зазоре и значительной линейной нагрузке реакция якоря по поперечной оси может не только ослабить магнитное поле под одной из частей главного полюса, но и перемагнитить его, т. е. изменить полярность — «опрокинуть поле». Некоторое увеличение воздушного зазора под главными полюсами, особенно на их краях, значительно ослабляет действие реакции якоря. Однако не следует забывать, что увеличение воздушного зазора ведет к необходимости повышения МДС обмотки главных полюсов, а следовательно, и к увеличению размеров полюсных катушек, полюсов и габарита машины в целом.

На этом же принципе уменьшения МДС поперечной реакции якоря за счет повышенного магнитного сопротивления на пути ее действия основан и другой способ ослабления действия реакции коря. Этот способ состоит в том, что сердечники главных полюсов делают из листовой анизотропной (холоднокатаной) стали (обычно применяют сталь марки 3411). Эта сталь в направлении проката обладает повышенной магнитной проницаемостью, а «поперек проката» — небольшой магнитной проницаемостью. Штамповать пластины полюсов из такой стали следует так, чтобы ось полюса совпадала с направлением проката листа стали.

3.5. Способы возбуждения машин постоянного тока

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля. В большинстве машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т. е. *способом возбуждения.*

По способам возбуждения машины постоянного тока можно классифицировать следующим образом:

машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рис. 3.8, *а*);

машины параллельного возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 3.8, *б*);

машины последовательного возбуждения (обычно применяемые в качестве двигателей), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 3.8, *в*)

машины смешанного возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения — параллельная ОВ1 и последовательная ОВ2 (рис. 3.8, *г*);

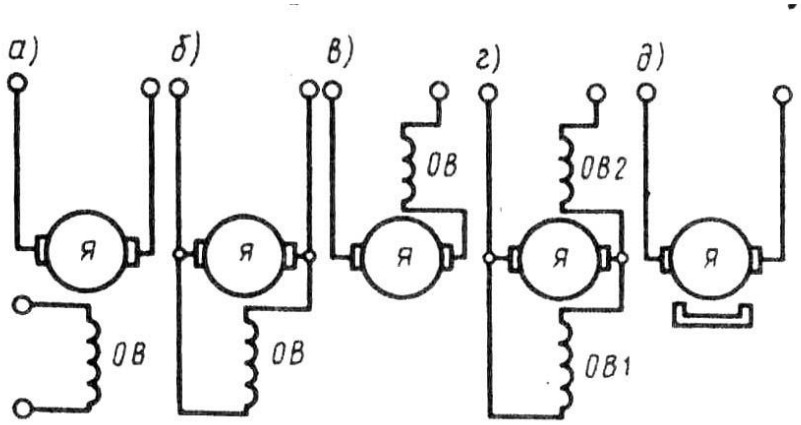


Рис.3.8. Способы возбуждения машин постоянного

машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 3.8, *д*).

Все указанные машины (кроме последних) относятся к машинам с *электромагнитным возбуждением*, так как магнитное поле в них создается электрическим током, проходящим в обмотке возбуждения.

Начала и концы машин постоянного тока согласно ГОСТу обозначаются: обмотка якоря — Я1 и Я2, обмотка добавочных полюсов — Д1 и Д2, компенсационная обмотка — К1 и К2, обмотка возбуждения независимая — М1 и М2, обмотка возбуждения параллельная (шунтовая) — Ш1 и Ш2, обмотка возбуждения последовательная (сериесная) — С1 и С2.

Контрольные вопросы

1. Какие участки содержит магнитная цепь машины постоянного тока?

2. В чем сущность явления реакции якоря машины постоянного тока?

3. Почему МДС якоря, действующая по поперечной оси, вызывает размагничивание машины по продольной оси?

4. Как учитывается размагничивающее действие реакции якоря при расчете числа витков полюсной катушки обмотки возбуждения?

5. С какой целью компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря?

6. Почему с увеличением воздушного зазора ослабляется размагничивающее влияние реакции якоря?

7. Какие способы возбуждения применяют в машинах постоянного тока?

Глава IY. Коммутация в машинах постоянного тока.

4.1.Причины, вызывающие искрение на коллекторе

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

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

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

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

Коммутационные причины искрения создаются физическими процессами, происходящими в машине при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

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

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

Согласно ГОСТу, искрение на коллекторе оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегающим краем щетки.

Степень 1 — искрения нет (темная коммутация).

Степень $1^{1}/_{4}$ — слабое искрение под небольшой частью щетки, не вызывающее почернения коллектора и появления нагара на щетках.

Степень $1^{1}/_{2}$ — слабое искрение под большей частью щетки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устраняемого протиранием поверхности коллектора бензином, и следов нагара на щетках.

Степень 2 — искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузке. Приводит к появлению следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках.

Степень 3 — значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также к подгару и разрушению щеток. Допускается только для моментов прямого (безреостатного) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Если допустимая степень искрения в паспорте электрической машины не указана, то при номинальной нагрузке она не должна превышать $1^{1}/_{2}$.

При вращении якоря машины постоянного тока коллекторные пластины поочередно вступают в соприкосновение со щетками. При этом переход щетки с одной пластины (сбегающей) на другую (набегающую) сопровождается переключением секции обмотки из одной

параллельной ветви в другую и изменением как значения, так и направления тока в этой секции. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и сопровождающие его явления называются коммутацией.

Секция, в которой происходит коммутация, называется коммутирующей, а продолжительность процесса коммутации — периодом коммутации:

$$T_к = [60/(Kn)](b_щ/ b_к)$$

где $b_щ$ — ширина щетки; К — число коллекторных пластин; n — частота вращения якоря, об/мин; $b_к$ — расстояние между серединами соседних коллекторных пластин (коллекторное деление).

Сложность процессов коммутации не позволяет рассмотреть коммутацию в общем виде. Поэтому для получения аналитических и графических зависимостей, поясняющих коммутацию, допускают, что ширина щетки равна коллекторному делению; щетки расположены на геометрической нейтрали; электрическое сопротивление коммутирующей секции и мест ее присоединения к коллектору по сравнению с сопротивлением переходного контакта «щетка— коллектор» пренебрежимо мало (обычно такое соотношение указанных сопротивлений соответствует действительности).

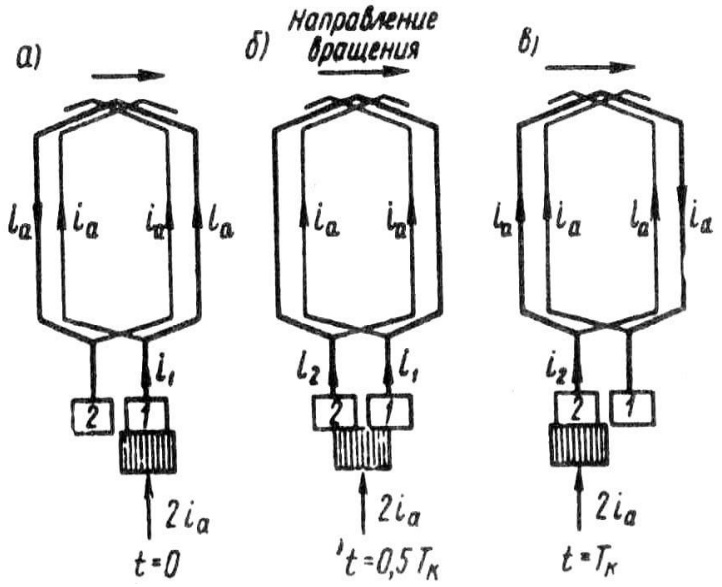


Рис. 4.1. Переход коммутирующей секции из одной параллельной ветви в другую

В начальный момент коммутации (рис. 4.1, а) контактная поверхность щетки касается только пластины 1, а коммутирующая секция относится к левой параллельной ветви обмотки и ток в ней равен i_a. Затем пластина 1 постепенно сбегает со щетки и на смену ей набегает пластина 2. В результате коммутирующая секция оказывается замкнутой щеткой и ток в ней постепенно уменьшается. В середине процесса коммутации ($t = 0,5T_К$) контактная поверхность щетки равномерно перекрывает обе коллекторные пластины (рис. 4.1, б). В конце коммутации ($t = T_к$) щетка полностью переходит на пластину 2 и теряет контакт с пластиной 1 (рис. 4.1, в), а ток в коммутирующей секции становится равным — i_a, т. е. по значению таким же, что и в начале коммутации, а по направлению — противоположным. При этом коммутирующая секция оказалась в правой параллельной ветви обмотки.

4.2. Прямолинейная коммутация

Этот вид коммутации имеет место в машине, если в процессе коммутации в коммутирующей секции ЭДС не наводится или, что более реально, сумма ЭДС в коммутирующей секции равна нулю. В этом случае для коммутирующей секции, замкнутой щеткой (рис. 27.1, б), в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 = 0 \qquad (4.1)$$

r_1 и r_2 — переходные сопротивления между щеткой и сбегающей 1 и набегающей 2 пласти – нами; i_1 и i_2 — токи, переходящие в обмотку якоря через пластины 1 и 2:

$$i_1 = i_a + i\ ; \quad i_2 = i_a - i \qquad (4.2)$$

здесь i – ток в коммутирующей секции.

Используя (27.2), получим

$$(i_a + i)r_1 - (i_a - i)r_2 = 0$$

откуда ток в коммутирующей секции

$$i = i_a(r_2 - r_1)/(r_2 + r_1) \qquad (4.3)$$

Закон изменения тока коммутирующей секции в функции времени определяется уравнением

$$i = i_a(1 - 2t/T_к). \qquad (4.4)$$

Это уравнение является линейным, а поэтому график $i = f(t)$ представляет собой прямую линию, пересекающую ось абсцисс в точке $t = 0{,}5\ T_k$ (рис. 4,2). Коммутация, при которой ток в коммутирующей секции i изменяется по прямолинейному закону, называют прямолинейной (идеальной) коммутацией.

Весьма важным фактором, определяющим качество коммутации, является плотность тока в переходном контакте «щетка-пластина»: j_i — плотность тока под сбегающим краем щетки; j_2 — плотность тока под набегающим краем щетки.

Плотность тока под щеткой прямо пропорциональна тангенсу угла между осью абсцисс и графиком коммутации, т.е. $j_1 \equiv \operatorname{tg} \alpha_1$, и $j_2 \equiv \operatorname{tg} \alpha_2$. График прямолинейной (идеальной) коммутации имеет вид прямой линии. При этом $\alpha_1 = \alpha_2$, а следовательно, плотность тока в переходном контакте «щетка — коллектор» в течение всего периода коммутации остается неизменной ($j_1 = j_2 = \text{const}$). Физически это объясняется тем, что при прямолинейной

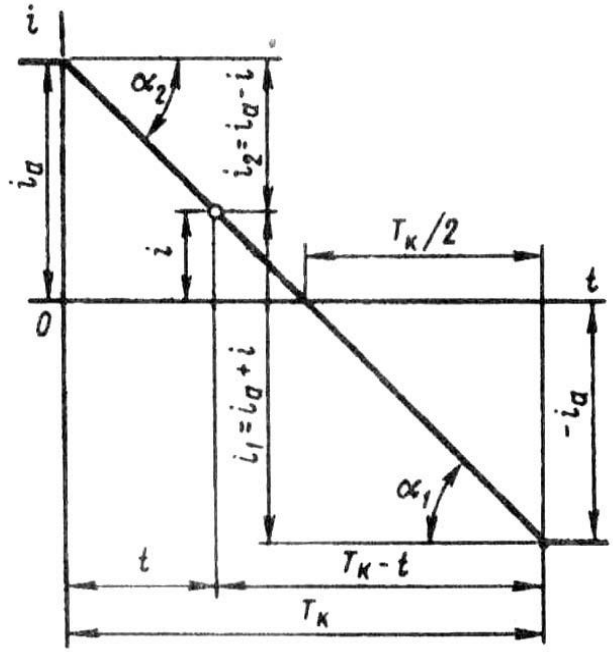


Рис. 4.2. График тока прямолинейной коммутации

коммутации убывание тока, проходящего через сбегающую пластину коллектора, пропорционально уменьшению площади контакта щетки с этой пластиной, а нарастание тока через набегающую пластину пропорционально увеличению площади контакта щетки с этой пластиной.

Из построений, сделанных на рис. 4.2, следует, что к моменту времени, когда щетка теряет контакт со сбегающей пластиной, ток через эту пластину уменьшается до нуля. Таким образом, при прямолинейной коммутации пластина коллектора выходит из-под щетки без разрыва тока.

Изложенные свойства прямолинейной (идеальной) коммутации — постоянство плотности тока под щеткой и выход пластины из-под щетки без разрыва тока — являются основными, и благодаря им этот вид коммуташи не сопровождается искрением на коллекторе.

4.3. Криволинейная замедленная коммутация

Период коммутации в современных машинах постоянного тока весьма мал и составляет приблизительно 10^{-3} - 10^{-5} с. При этом средняя скорость изменения тока в коммутирующей секции $(di/dt)_{ср} = 2i_a/T_к$ очень велика, что приводит к появлению в коммутирующей секции ЭДС самоиндукции

$$e_L = - L_c (di/dt), \qquad (4.5)$$

где L_c — индуктивность секции; i — ток в коммутирующей секции.

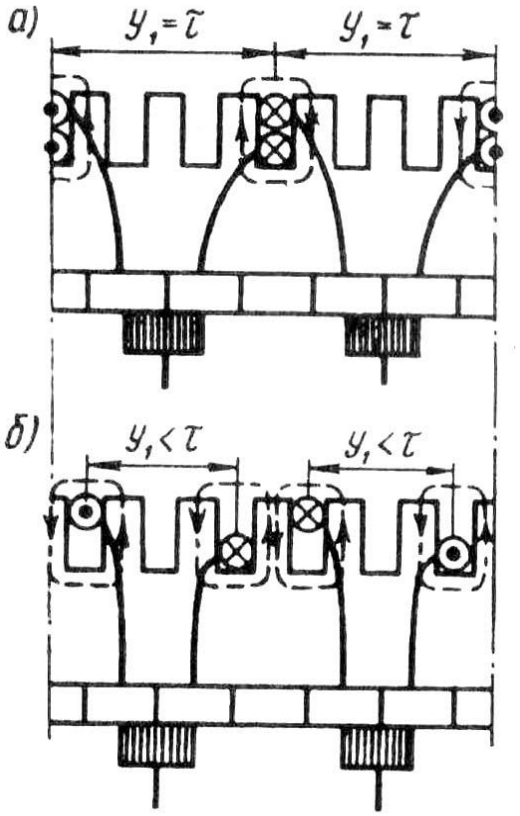


Рис.4.3. Магнитная связь одновременно коммутирующих секций:
а — при полном шаге ($y_1 = \tau$); б — при укороченном шаге обмотки якоря ($y_1 < \tau$)

Обычно в каждом пазу якоря находится несколько пазовых сторон (не менее двух), принадлежащих разным секциям. При этом если шаг обмотки полный ($y_1 = \tau$), то все эти секции одновременно находятся в состоянии коммутации, будучи замкнутыми разными щетками (рис. 27.3, а). Обычно ширина щетки больше коллекторного деления и каждая щетка замыкает одновременно несколько секций. Так как пазовые части коммутирующих секций

лежат в одних пазах, то изменяющийся магнитный поток каждой из этих частей наводит в пазовых частях других секций ЭДС взаимоиндукции

$$e_м = - M_c\,(di/\,dt), \qquad (4.6)$$

где M_c — взаимная индуктивность одновременно коммутирующих секций.

Обе ЭДС создают в коммутирующей секции реактивную (результирующую) ЭДС

$$e_p = e_L + e_м = -(L_c + M_c)(di/\,dt) \qquad (4.7)$$

которая препятствует изменению тока в коммутирующей секции. Кроме того, под влиянием реакции якоря магнитная индукция в зоне коммутации (на геометрической нейтрали) приобретает некоторое значение $B_к$, под действием которой в коммутирующей секции наводится ЭДС вращения

$$e_{вр} = B_к\, 2lw_cv, \qquad (4.8)$$

где l — длина пазовых частей секции; w_c — число витков в секции; v — линейная скорость движения секции.

Электродвижущая сила вращения в отличие от реактивной ЭДС может иметь разное направление в зависимости от полярности внешнего магнитного поля в зоне коммутации. Если машина не имеет добавочных полюсов, то ЭДС вращения направлена согласованно с реактивной ЭДС. В этом случае в контуре коммутирующей секции действует сумма ЭДС

$$\sum e = e_p + e_{в.р.} \qquad (4.9)$$

С учетом изложенного уравнение по второму закону Кирхгофа для коммутирующей секции замкнутой щеткой имеет вид

$$i_1r_1 - i_2r_2 = \sum e \qquad (4.10)$$

или с учетом (27.3) запишем выражение тока в коммутирующей секции при криволинейной замедленной коммутации:

$$i = [i_a(r_2 - r_1)/\,(r_2 + r_1)] + [\sum e/\,(r_2 + r_1)] \qquad (4.11)$$

Первое слагаемое правой части полученного выражения представляет собой ток прямолинейной коммутации [см. (4.3)]

$$i_{пр} = i_a(r_2 - r_1)/\,(r_2 + r_1) \qquad (4.12)$$

Второе слагаемое правой части выражения (4.11) определяет значение дополнительного тока коммутации, возникающего в контуре коммутирующей секции под действием ЭДС $\sum e$:

$$i_д = \sum e\,/(r_2 + r_1). \qquad (4.13)$$

Таким образом, ток в коммутирующей секции при криволинейной замедленной коммутации равен сумме двух составляющих:

$$i = i_{пр} + i_д. \qquad (4.14)$$

Характер изменения тока $i_{пр}$ определяется графиком, показанным на рис. 4.2. Что же касается дополнительного тока коммутации $i_д$, то для определения характера его изменения за период коммутации необходимо предварительно выяснить, как меняются за период коммутации величины, определяющие этот ток, а именно ЭДС $\sum e$ и сумма сопротивлений ($r_2 + r_1$).

Если в машине нет добавочных полюсов и магнитная индукция в зоне коммутации $B_к$ невелика, то ЭДС $\sum e$ определяется главным образом реактивной ЭДС $e_p = -(L_c+M_c)(di/dt)$. При прямолинейном законе изменения тока di/dt = const, а следовательно, $\sum e$ = const.

Закон изменения суммы сопротивлений ($r_1 + r_2$) определяется выражением

$$r_2 + r_1 = \frac{R S_k}{\upsilon_k I_{щ}}\left(\frac{1}{T_k - t} + \frac{1}{t}\right) = R\left(\frac{T_k}{T_k - t} + \frac{T_k}{t}\right) \qquad (4.15)$$

где R — сопротивление переходного контакта «щетка—пластина», когда пластина коллектора полностью перекрыта щеткой и площадь ее переходного контакта равна S_k.

В начале (t = 0) и в конце ($t = T_к$) коммутации $r_1 + r_2 = \infty$; при $t = 0{,}5\ T_k$ Гц сумма сопротивлений $r_2 + r_1 = 4R$. На рис. 4.4, *а* представлен график $(r_2 + r_1) = f(t)$. Этому закону изменения суммы сопротивлений и постоянству ЭДС $\sum e$ соответствует кривая 1 изменения добавочного тока коммутации $i_д = f(t)$ представленная на рис. 4.4, б.

График изменения результирующего тока коммутации $i = i_{пр} + i_д = f(t)$, полученный сложением ординат графиков тока прямолинейной коммутации $i_{пр} = f(t)$ (см. рис. 4.2) и добавочного тока коммутации $i_д = f(t)$ (см. рис. 4.4, б, график 1), представлен на рис. 4.5. Криволинейный вид этого графика обусловлен криволинейностью графика $i_д = f(t)$. Физически это объясняется реактивным действием суммарной ЭДС $\sum e$, наводимой в коммутирующей секции, препятствующей изменениям тока в этой секции от $+ i_a$ в начале коммутации до $- i_a$ в ее конце. По этой причине в середине периода коммутации (точка а) ток в коммутирующей секции $i_a = i_д$, т.е. он не равен нулю, как это имело место при прямолинейной коммутации (см. рис. 4.2), а равен добавочному току коммутации $i_д$, который в этот момент времени ($t = 0{,}5\ T_к$) имеет наибольшее значение (см. рис. 4.4, б, график 1). Уменьшение тока i_a до нуля и изменение его направления
наступают во второй половине периода коммутации в момент времени $t > 0{,}5\ T_к$ (точка b), т. е. по
сравнению с прямолинейной в рассматриваемом виде коммутации процесс изменения направления тока в коммутирующей секции затягивается во времени. В итоге график коммутации приобретает криволинейный вид. По этой причине такую коммутацию называют криволинейной замедленной. Характерный признак этого вида коммутации — неодинаковая плотность тока под щеткой в начале и в конце периода коммутации.

В этом можно убедиться, воспользовавшись построениями, сделанными на рис. 4.5, для момента времени $t = 0{,}5\ T_к$.

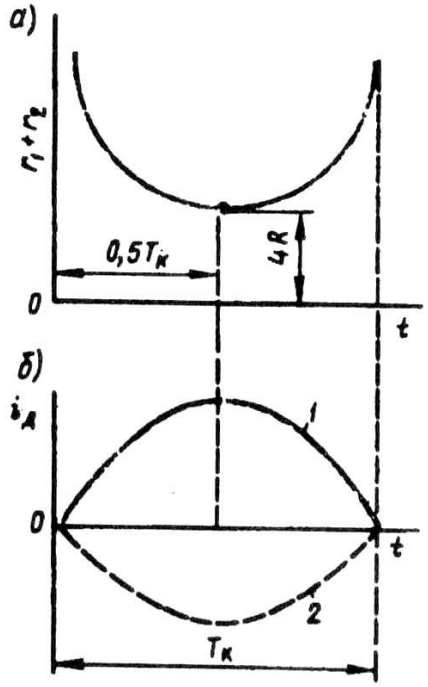


Рис. 4.4. Графики изменений сопротивлений ($r_1 + r_2$) и тока $i_д$

Среднее значение плотности тока под набегающим краем щетки j_2, имеющим контакт с пластиной 2 (рис. 4.6, а), меньше среднего значения плотности тока j_1 под сбегающим краем щетки, имеющим контакт с пластиной 1. С одной стороны, это объясняется тем, что $\operatorname{tg} \alpha_2 < \operatorname{tg} \alpha_1$, (см. рис. 4.5), а с другой стороны, тем, что при $t = 0{,}5\ T_к$ токи, отходящие в обмотку якоря через пластины 1 и 2, не равны: $i_2 < i_1$. При криволинейной замедленной коммутации площадь S_1 соприкосновения пластины 1 с щеткой уменьшается быстрее, чем ток $i_1 = i_a + i_д$, а поэтому плотность тока под сбегающим краем щетки повышается. К концу

периода коммутации эта плотность тока достигает наибольшего значения $j \equiv \operatorname{tg} \alpha'_1$, где α'_1 соответствует $t \approx T_к$ (см. рис. 27.5).

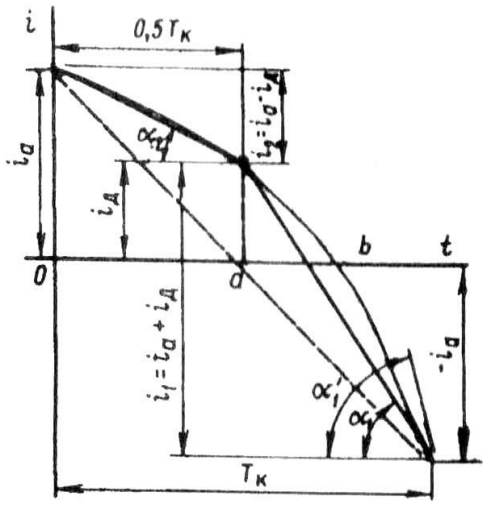


Рис. 4.5. График тока криволинейной замедленной коммутации

При значительных нагрузках машины плотность тока под сбегающим краем щетки может достигнуть недопустимо больших значений и вызвать искрение на коллекторе. Однако, как показывает опыт, возможно появление искрения и при небольших нагрузочных токах в цепи якоря. Это свидетельствует о том, что увеличение плотности тока под сбегающим краем щетки не единственная причина искрения на коллекторе. Искрение возникает также при размыкании замкнутой накоротко щеткой цепи коммутирующей секции при выходе сбегающей пластины коллектора из-под щетки. В момент размыкания коммутирующей секции с добавочным током коммутации накопленная в ней энергия магнитного поля (Дж)

$$W = 0{,}5\, L_c\, i^2_д \qquad (4.16)$$

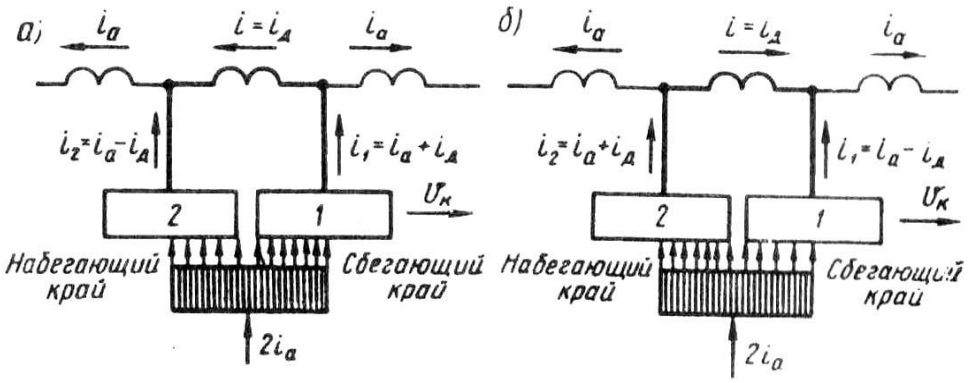


Рис. 4.6. Распределение плотности тока под щеткой при криволинейной замедленной (а) и ускоренной (б) видах коммутации

затрачивается на создание электрической дуги между сбегающим краем щетки и сбегающей коллекторной пластиной.

Изложенные выше свойства криволинейной замедленной коммутации — повышение плотности тока под сбегающим краем щетки и выход сбегающей пластины из-под щетки с разрывом цепи тока коммутации — создают условия к возникновению искрения на коллекторе под сбегающими краями щеток.

4.4. Способы улучшения коммутации

Основная причина неудовлетворительной коммутации в машинах постоянного тока — добавочный ток коммутации

$$i_д = \sum e / \sum r_к \quad (4.17)$$

Здесь $\sum r_к$ — сумма электрических сопротивлений добавочному току коммутации $i_д$: сопротивления мест пайки в петушках, переходного контакта между коллекторными пластинами и щеткой и собственно щетки.

Однако из перечисленных сопротивлений, входящих в $\sum r_к$, наибольшее значение имеет сопротивление щетки и переходного контакта, поэтому, обозначив их $r_щ$, с некоторым приближением можно записать

$$i_д = \sum e / r_щ \quad (4.18)$$

Из полученного выражения следует, что уменьшить ток $i_д$, а следовательно улучшить коммутацию, можно либо увеличением сопротивления $r_щ$, либо уменьшением суммарной ЭДС $\sum e$ в коммутирующей секции. Отсюда вытекает ряд способов улучшения коммутации, основные из которых рассмотрены ниже.

Выбор щеток. С точки зрения обеспечения удовлетворительной коммутации целесообразнее применять щетки с большим переходным падением напряжения в переходном контакте и собственно щетке, т. е. щетке с большим сопротивлением $r_щ$. Однако допустимая плотность тока в щеточном контакте этих щеток невелика, а поэтому их применение в машинах со значительным рабочим током ведет к необходимости увеличения площади щеточного контакта, что требует увеличения площади коллектора за счет его длины. Это привело бы к увеличению габаритов машины и дополнительному расходу меди. Поэтому щетки с большим $r_щ$ применяют преимущественно в машинах с относительно высоким напряжением, а следовательно, и с небольшим рабочим током.

Щетки для электрических машин разделяют на четыре группы, различающиеся составом, способом изготовления и характеристиками (табл. 4.1). Выбирают щетки в соответствии с рекомендациями, выработанными на основании многолетнего опыта проектирования и эсплуатации электрических машин. Наибольшее применение в машинах постоянного тока напряжением 110 — 440 В имеют электрографитированные щетки.

Увеличению переходного сопротивления щеточного контакта, а следовательно улучшению коммутации, способствует политура коллектора — тонкая оксидная пленка на поверхности коллектора, обладающая повышенным электрическим сопротивлением.

Уменьшение реактивной ЭДС. Существенное влияние на суммарную ЭДС в коммутирующей секции оказывает реактивная ЭДС $e_р = e_l + e_м$. ЭДС взаимоиндукции $e_м$ в значительной степени зависит от ширины щетки: чем шире щетка, тем большее число коллекторных пластин перекрывает она одновременно, а следовательно, тем больше секций одновременно коммутируется, что вызывает повышение ЭДС взаимоиндукции $e_м$. Однако слишком узкие щетки также нежелательны из-за недостаточной механической прочности, а также потому, что для создания необходимой площади контактной поверхности в узкой щетке

Таблица 4.1

Группа щеток, обозначение	Переходное падение напряжения на пару щеток при номина- льном токе, В	Номинальная плот- ность тока, А/мм^2	Область применения
Графитовые Г, 611М	1,9—2,0	0,11—0,12	Для машин с облегченными условиями коммутации

Электрографитированные ЭГ	2,0—2,7	0,10—0,15	Для машин со средними и затрудненными условиями коммутации и для контактных колец
Угольно-графитовые УГ;Т	2,0	0,06—0,07	Для машин со средними условиями коммутации
Медно-графитовые М, МГ	0,2—1,5	0,15—0,20	Для низковольтных (до 48 В) машин и контактных

пришлось бы увеличить ее длину, а это привело бы к необходимости увеличения длины коллектора. Наиболее целесообразны щетки шириной в 2—3 коллекторных деления.

Заметное влияние на реактивную ЭДС оказывает тип обмотки якоря. Так, если обмотку якоря выполнить с укороченным шагом ($y_1 < \tau$), то активные стороны одновременно коммутирующих секций окажутся в разных пазах (см. рис. 4.3, б), что будет способствовать уменьшению ЭДС взаимоиндукции. Реактивная ЭДС может быть ослаблена уменьшением индуктивности секций L_c. Для этого следует применять в обмотке якоря секции с большим числом витков ($L_c \equiv w_c$) и полузакрытые пазы. Однако осуществление многих мероприятий привело бы к созданию громоздких и неэкономичных машин. Поэтому при проектировании машин постоянного тока выбор указанных параметров связывают со стремлением получить компактную и экономичную машину. При этом реактивная ЭДС может быть в значительной степени уменьшена или даже полностью устранена созданием в зоне коммутации (по оси щеток) коммутирующего поля определенной полярности и величины. Создается такое поле добавочными полюсами или сдвигом щеток геометрической нейтрали.

Добавочные полюсы. Назначение добавочных полюсов – создать в зоне коммутации магнитное поле такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутирующей секции ЭДС вращения $e_{вр}$ компенсировала реактивную ЭДС $e_р$. В машине постоянного тока без принятия мер по улучшению коммутации ЭДС $e_р$ и $e_{вр}$ направлены в одну сторону, т. е. действуют согласно:

$$\sum e = \vec{e_p} + \vec{e_{вр}}.$$

Суммарная ЭДС в коммутирующей секции $\sum e$ окажется равной нулю, если посредством добавочных полюсов создать в зоне коммутации магнитное поле с магнитной индукцией $B_к$ такой величины и направления, чтобы ЭДС вращения $e_{вр}$ изменила свое направление на обратное [см. 4.8)], а значение ее было бы равно ЭДС реактивной $e_р$. В этом случае

$$\sum e = \vec{e_p} + \overleftarrow{e_{вр}} = 0.$$

и коммутация становится прямолинейной (идеальной).

Добавочные полюсы располагают между главными. При этом щетки устанавливают на геометрической нейтрали.

Все машины постоянного тока мощностью свыше 1 кВт снабжаются добавочными полюсами, число которых принимают равным числу главных полюсов или же вдвое меньшим. Наличие добавочных полюсов позволяет увеличить линейную нагрузку машины и при заданной мощности получить машину меньшего веса и габаритов.

Число витков обмотки добавочных полюсов выбирают таким, чтобы МДС добавочных полюсов компенсировала МДС якоря по поперечной оси в зоне коммутации и имела некоторый избыток, необходимый для создания коммутирующего поля с индукцией $B_к$, направленного противоположно полю реакции якоря (рис. 4.7). Исходя из этого, МДС добавочного полюса для некомпенсированных машин постоянного тока принимают равной (А)

$$F_д = k_д F_a \qquad (4.19)$$

где $k_д = F_д / F_a$ - коэффициент, учитывающий требуемое превышение МДС обмотки добавочного полюса $F_д$ над МДС якоря F_a. Для машин постоянного тока современных серий этот коэффициент принимают равным $k_д = 1{,}20 \div 1{,}45$.

Если машина снабжена компенсационной обмоткой, то МДС добавочных полюсов следует уменьшить на величину МДС компенсационной обмотки $F_{к.о}$. Обычно в компенсированных машинах постоянного тока МДС добавочных полюсов на 15—30 % больше МДС якоря.

Если МДС добавочных полюсов сделать больше требуемого значения [см. (4.19)], то ЭДС вращения $e_{вр}$ станет больше реактивной ЭДС. В этом случае суммарная ЭДС $\sum e$ изменит свой знак, а добавочный ток коммутации — свое направление на противоположное по сравнению с тем, какое он имел при криволинейной замедленной коммутации (см. рис. 27.4,6, кривая 2).

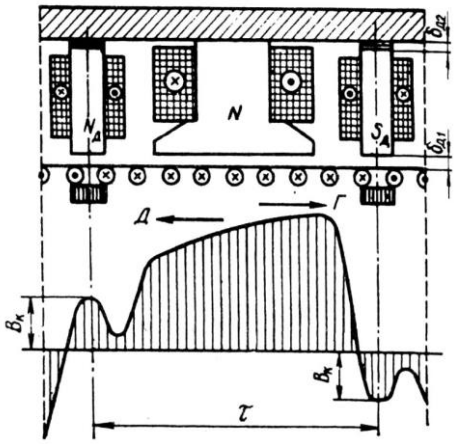


Рис. 4.7. Результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины с добавочными полюсами в генераторном (Г) и двигательном (Д) режимах

График изменения результирующего тока коммутации $i_2 = i_a + i_д$ в этом случае принимает вид, представленный на рис. 4.8, т. е. коммутация становится криволинейной ускоренной, так как ток в коммутирующей секции достигает нулевого значения за время $T < 0{,}5\ T_к$ (точка b). Для криволинейной ускоренной коммутации характерно повышение плотности тока под набегающим краем щетки (см. рис. 27.6, б). Объясняется это тем, что при этом виде коммутации площадь соприкосновения пластины 2 с щеткой нарастает медленнее, чем увеличивается ток $i_2 = i_a + i_д$. Наибольшее значение плотности тока $y'_2 \equiv \operatorname{tg} \alpha'_2$ соответствует началу периода коммутации ($t \approx 0$). При значительных нагрузках это может привести к искрению под набегающим краем щетки. Это объясняется тем, что при ускоренной коммутации выход сбегающей пластины из-под щетки происходит с разрывом цепи добавочного тока коммутации, который имеет направление, противоположное току замедленной коммутации.

Для обеспечения компенсации реактивной ЭДС при различных нагрузках машины обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря. В этом случае МДС добавочных полюсов $F_д$ при различных нагрузках машины изменяется пропорционально току якоря I_a, т. е. пропорционально МДС якоря F_a.

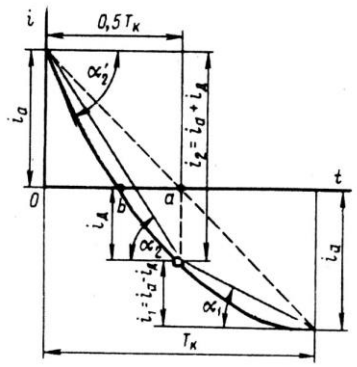


Рис. 4.8. График тока криволинейной ускоренной коммутации

Полярность добавочного полюса в генераторе должна быть такой же, как и у следующего по направлению вращения главного полюса, а в двигателе — как у предшествующего полюса (рис. 4.9).

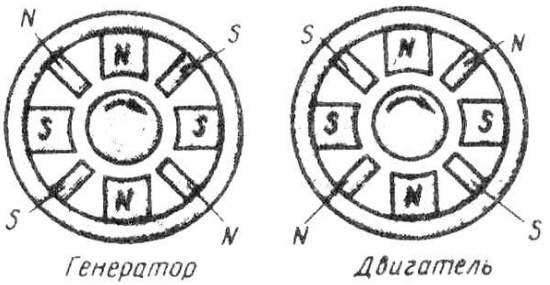


Рис.4.9. Полярность добавочных полюсов при работе машины в генераторном и двигательном режимах

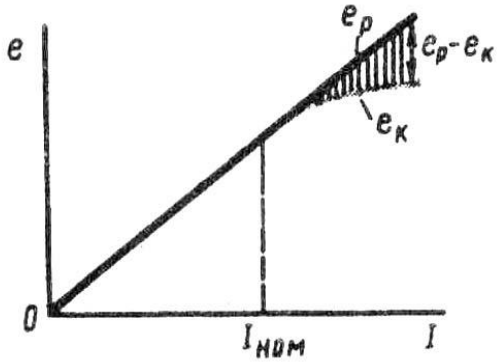


Рис.4.10. График изменения ЭДС в при работе машины в генераторном и коммутирующей секции в зависимости двигательном режимах от тока нагрузки

Добавочные полюсы обеспечивают удовлетворительную коммутацию в машине только в пределах номинальной нагрузки.

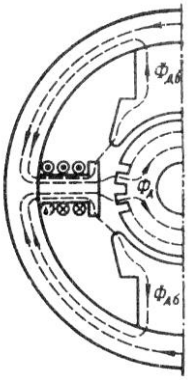


Рис. 4.11. К понятию о потоке рассеяния добавочных полюсов

При перегрузке машины происходит насыщение магнитной цепи добавочных полюсов. В этом случае реактивная ЭДС $e_р$ изменяется пропорционально току нагрузки, а рост ЭДС внешнего поля из-за насыщения магнитной цепи несколько задерживается (рис. 4.10). В результате в коммутирующей секции появляется суммарная ЭДС $\sum e = e_р - e_к$, т. е. коммутация становится замедленной. Насыщению сердечников добавочных полюсов способствует магнитный поток рассеяния $Ф_{дσ}$, замыкающийся через сердечники смежных главных полюсов и станину (рис. 4.11). В целях уменьшения магнитного потока рассеяния, а следовательно, обеспечения более линейной зависимости потока добавочных полюсов от тока нагрузки воздушный зазор добавочного полюса $δ_д$ разделяют на два: один — между сердечником полюса и якорем $δ_{д1}$, — а другой между сердечником полюса и станиной $δ_{д2}$ (см. рис. 4.7). В этом случае зазор $δ_{д2}$ ограничит значение потока $Ф_{дσ}$. Зазор $δ_{д2}$ создается пакетом немагнитных прокладок, закладываемых между сердечником полюса и станиной.

Получение коммутирующего поля смещением щеток. В машинах постоянного тока мощностью до 1 кВт, выполняемых без добавочных полюсов, коммутирующее поле в зоне коммутации создается смещением щеток с геометрической нейтрали. Если щетки

установлены на геометрической нейтрали (рис.4.12, а), то поперечное магнитное поле якоря с магнитной индукцией B_{aq} создает в зоне коммутации индукцию $B_к$ (рис. 4.12, б). В результате в коммутирующих секциях наводится ЭДС вращения $e_{вр}$, направленная согласованно с реактивной ЭДС $e_р$ и способствующая замедленной коммутации. При сдвиге щеток на

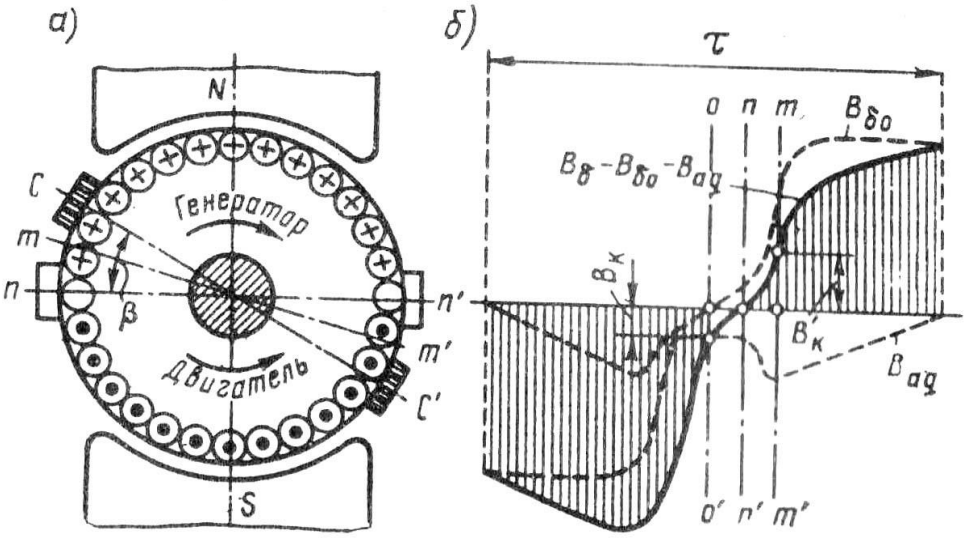


Рис. 27.12. Создание коммутирующего поля сдвигом щеток

физическую нейтраль mm' коммутирующее поле с индукцией $B_к$ исчезает и ЭДС вращения $e_{вр} = 0$. При этом в коммутирующих секциях наводится лишь реактивная ЭДС $e_р$. Если же щетки сдвинуть на угол β, т. е. за физическую нейтраль mm' (линия cc'), то коммутирующее поле с индукцией $B'_к$ изменит свое направление относительно направления при положении щеток на геометрической нейтрали. Это поле будет наводить в коммутирующих секциях ЭДС вращения, равную реактивной ЭДС и противоположную ей по направлению ($e_{вр} - e_р = 0$), т. е. реактивная ЭДС окажется скомпенсированной и коммутация станет прямолинейной (идеальной). Для получения необходимого эффекта щетки следует смещать в направлении вращения якоря у генераторов или против вращения якоря у двигателей.

Описанный способ улучшения коммутации имеет следующие недостатки: а) коммутирующее поле изменяется не пропорционально нагрузке машины, что исключает полную компенсацию реактивной ЭДС во всем диапазоне нагрузок, так как для этого пришлось бы при каждом изменении нагрузки менять положение щеток (обычно щетки устанавливают в фиксированное положение, соответствующее полной компенсации реактивной ЭДС при номинальной нагрузке); б) при смещении щеток с геометрической нейтрали усиливается размагничивающее действие реакции якоря; в) для реверсируемых машин смещение щеток с геометрической нейтрали недопустимо, так как требуемое направление смещения физической нейтрали меняется с изменением направления вращения якоря.

4.5. Круговой огонь по коллектору

При значительных перегрузках или внезапном коротком замыкании машины постоянного тока коммутация приобретает резко замедленный характер. В этом случае между сбегающей коллекторной пластиной и сбегающим краем щетки возникает электрическая дуга. Так

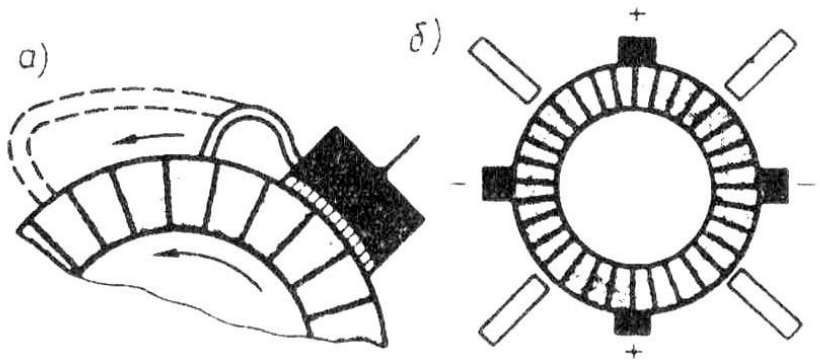


Рис. 4.13. Растяжение электрической дуги на вращающемся коллекторе (а) и расположение между щетками (б)

как коллектор вращается, то дуга механически растягивается (рис.4.13, а). Наряду с этим перегрузка машины сопровождается усилением реакции якоря, под действием которой распределение индукции в воздушном зазоре машины становится не равномерным. В результате напряжение между соседними коллекторными пластинами увеличивается, превышая допустимые пределы. Это, с одной стороны, может привести к возникновению электрических дуг между смежными пластинами, а с другой стороны, появление высокого потенциала на некоторых пластинах вызывает резкое повышение напряжения между щеткой и коллекторными пластинами по мере их удаления от сбегающего края щетки. Все это создает условия для возникновения электрической дуги между щеткой и коллекторными пластинами.

Таким образом, в условиях значительной перегрузки в машине постоянного тока появляются коммутационные и потенциальные причины для возникновения электрической дуги на коллекторе. При этом электрические дуги, вызванные коммутационными причинами, сливаются с дугами, вызванными потенциальными причинами, образуя вокруг коллектора мощную электрическую дугу, которая может перекинуться также и на корпус машины. Описанное явление называется круговым огнем по коллектору. Круговой огонь очень опасен, так как может привести к тяжелой аварии машины, включая возникновение в машине пожара.

Добавочные полюсы и компенсационная обмотка хотя и ослабляют опасность возникновения кругового огня, но полностью ее не устраняют. Поэтому для защиты обмотки якоря от повреждения электрической дугой в случае возникновения кругового огня в электрических машинах, работающих в условиях частых перегрузок, между коллектором и обмоткой на якоре устанавливают изолирующий экран. В некоторых машинах применяют воздушное дутье, сдувающее дугу в сторону подшипника, защищенного теплостойкой изоляционной перегородкой. Для создания препятствия на пути распространения дуги между щетками разной полярности устанавливают барьеры из изоляционного материала (рис. 4.13, б).

4.6. Радиопомехи от коллекторных машин и способы их подавления

При неудовлетворительной коммутации коллекторная машина становится источником радиопомех, ухудшающих качество радиоприема, а иногда делающих его невозможным, поэтому уровень индустриальных радиопомех не должен превышать значений, определяемых действующими нормами.

Радиопомехи распространяются двумя путями: по эфиру (электромагнитное излучение) и через электросеть. Для подавления помех, распространяемых по эфиру, электрические машины экранируют. В качестве экрана используют заземленный корпус машины. Если со стороны коллектора в машине имеются окна, то их следует закрыть металлическим колпаком или сеткой, обеспечив им надежный контакт с корпусом машины.

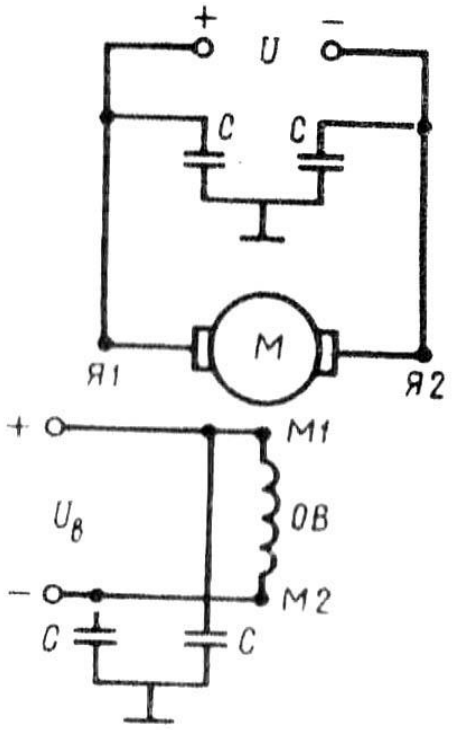


Рис. 4.14. Схема включения помехозащитного фильтра

Для подавления помех, проникающих от машины в сеть, применяют симметрирование обмоток и включение фильтров. Симметрирование обмоток состоит в том, что каждую обмотку, включенную последовательно в цепь якоря, разделяют на две равные части и присоединяют симметрично к щеткам разной полярности.

Применение фильтров — основной способ подавления радиопомех. Для большинства машин достаточно установить емкостный фильтр в виде конденсаторов, включаемых между каждым токонесущим проводом и корпусом машины (рис.4.14). Значение емкости конденсаторов подбирают опытным путем, при этом они должны быть рассчитаны на рабочее напряжение машины. Для фильтров предпочтительны проходные конденсаторы типа КБП, у которых одним из зажимов является металлическая оболочка, прикрепляемая непосредственно к корпусу машины.

Контрольные вопросы

1.Какие причины могут вызвать искрение на коллекторе?
2.Какие степени искрения предусмотрены ГОСТом? Дайте каждой из них характеристику и укажите условия допустимости.
3.Почему прямолинейная коммутация не сопровождается искрением?
4.Какие причины, вызывающие искрение, возникают при замедленной коммутации?
5.Объясните назначение и устройство добавочных полюсов.
6.Каковы причины, способные вызвать круговой огонь по коллектору?
7.Как можно снизить уровень радиопомех в коллекторной машине?

Глава Y. Коллекторные генераторы постоянного тока .

5.1. Основные понятия

В процессе работы генератора постоянного тока в обмотке якоря индуцируется ЭДС E_a. При подключении к генератору нагрузки в цепи якоря возникает ток, а на выводах генератора устанавливается напряжение, определяемое уравнением напряжений для цепи якоря генератора:

$$U = E_a - I_a \sum r . \qquad (5.1)$$

Здесь

$$\sum r = r_a + r_Д + r_{к.о} + r_c + r_щ \qquad (5.2)$$

— сумма сопротивлений всех участков цепи якоря: обмотки якоря r_a, обмотки добавочных полюсов $r_Д$, компенсационной обмотки $r_{к.о}$, последовательной обмотки возбуждения r_c и переходного щеточного контакта $r_щ$.

При отсутствии в машине каких-либо из указанных обмоток в (5.2) не входят соответствующие слагаемые.

Якорь генератора приводится во вращение приводным двигателем, который создает на валу генератора вращающий момент M_1. Если генератор работает в режиме х.х. $(I_a = 0)$, то для вращения его якоря нужен сравнительно небольшой момент холостого хода M_0. Этот момент обусловлен тормозными моментами, возникающими в генераторе при его работе в режиме х.х.: моментами от сил трения и вихревых токов в якоре.

При работе нагруженного генератора в проводах обмотки якоря появляется ток, который, взаимодействуя с магнитным полем возбуждения, создает на якоре электромагнитный момент *M* [см. (5.24)]. В генераторе этот момент направлен встречно вращающему моменту приводного двигателя *ПД* (рис. 5.1), т. е. он является нагрузочным (тормозящим).

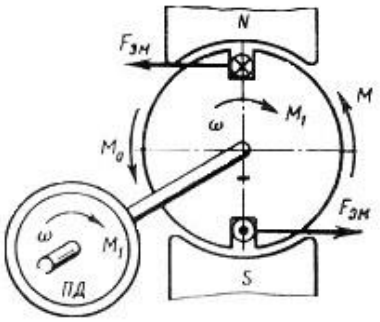


Рис. 5.1. Моменты, действующие в генераторе постоянного тока

При неизменной частоте вращения $(n = const)$ вращающий момент приводного двигателя M_1 уравновешивается суммой противодействующих моментов: моментом х.х. M_0 и электромагнитным моментом *M,* т. е.

$$M_1 = M_0 + M . \qquad (5.3)$$

Выражение (28.3) — *уравнение моментов для генератора* при $n = const$. Умножив члены уравнения (28.3) на угловую скорость вращения якоря ω, получим уравнение мощностей:

$$P_1 = P_0 + P_{ЭМ} , \qquad (5.4)$$

где $P_1 = M_1\omega$ — подводимая от приводного двигателя к генератору мощность (механическая); $P_0 = M_0\omega$ — мощность х.х., т. е. мощность, подводимая к генератору в режиме х.х.

(при отключенной нагрузке); $P_{ЭМ} = M\omega$ — электромагнитная мощность генератора.

$$P_{ЭМ} = E_a I_a,$$

или с учетом (5.1)

$$P_{ЭМ} = UI_a + I_a^2 \sum r = P_2 + P_{Эа}, \qquad (5.5)$$

где P_2 — полезная мощность генератора (электрическая), т. е. мощность, отдаваемая генератором нагрузке; $P_{Эа}$ — мощность потерь на нагрев обмоток и щеточного контакта в цепи якоря.

Учитывая потери на возбуждение генератора $P_{Э.В}$, получим уравнение мощностей для генератора постоянного тока:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{Эа} + P_{ЭВ}. \qquad (5.6)$$

Следовательно, *механическая мощность, развиваемая приводным двигателем* P_1, *преобразуется в генераторе в полезную электрическую мощность* P_2, *передаваемую нагрузке, и мощность, затрачиваемую на покрытие потерь* $(P_0 + P_{Эа} + P_{ЭВ})$.

Так как генераторы обычно работают при неизменной частоте вращения, то их характеристики рассматривают при условии $n = const$. Рассмотрим основные характеристики генераторов постоянного тока.

Характеристика холостого хода — зависимость напряжения на выходе генератора в режиме х.х. U_0 от тока возбуждения I_B:

$$U_0 = f(I_B) \text{ при } I = 0 \text{ и } n = const.$$

Нагрузочная характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора U при работе с нагрузкой от тока возбуждения I_B:

$$U = f(I_B) \text{ при } I \neq 0 \text{ и } n = const.$$

Внешняя характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора U от тока нагрузки I:

$$U = f(I_B) \text{ при } r_{рг} = const \text{ и } n = const,$$

где $r_{рг}$ — регулировочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения.

Регулировочная характеристика — зависимость тока возбуждения I_B от тока нагрузки I при неизменном напряжении на выходе генератора:

$$I_B = f(I) \text{ при } U = const \text{ и } n = const.$$

Вид перечисленных характеристик определяет рабочие свойства генераторов постоянного тока.

5.2. Генератор независимого возбуждения

Схема включения генератора независимого возбуждения показана на рис. 5.2, *а.* Реостат $r_{рг}$, включенный в цепь возбуждения, дает возможность регулировать ток I_B в обмотке возбуждения, а следовательно, и основной магнитный поток машины. Обмотка возбуждения питается от источника энергии постоянного тока: аккумулятора, выпрямителя или же другого генератора постоянного тока, называемого в этом случае *возбудителем.*

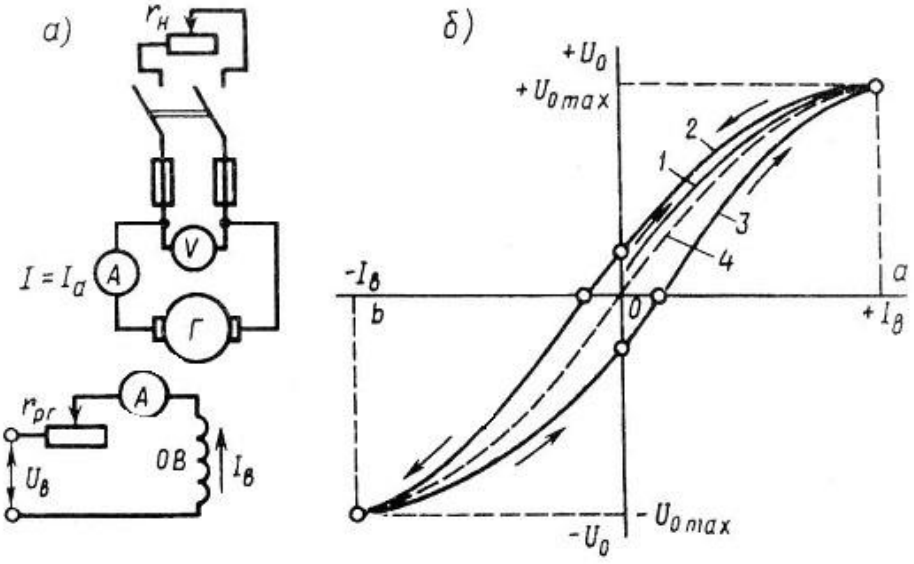


Рис. 5.2 Принципиальная схема (а) и характеристики х.х. (*б*) генератора независимого возбуждения

Характеристика холостого хода. При снятии характеристики $U_0 = f(I_B)$ генератор работает в режиме х.х. $(I_a = 0)$. Установив номинальную частоту вращения и поддерживая ее неизменной, постепенно увеличивают ток в обмотке возбуждения I_B от нулевого значения до $+I_B = Oa$, при котором напряжение х.х. $U_0 = 1{,}15U_{ном}$. Получают данные для построения кривой *1* (рис. 5.2, *б*). Начальная ордината кривой *1* не равна нулю, что объясняется действием небольшого магнитного потока остаточного магнетизма, сохранившегося от предыдущего намагничивания машины. Уменьшив ток возбуждения до нуля, и изменив его направление, постепенно увеличивают ток в цепи возбуждения до $-I_B = Ob$. Полученная таким образом кривая *2* называется *нисходящей ветвью характеристики.* В первом квадранте кривая *2* располагается выше кривой *1*. Объясняется это тем, что в процессе снятия кривой *1* произошло увеличение магнитного потока остаточного намагничивания. Далее опыт проводят в обратном направлении, т. е. уменьшают ток возбуждения от $-I_B = Ob$ до $I_B = 0$, а затем увеличивают его до значения $+I_B = Oa$. В результате получают кривую *3,* называемую *восходящей ветвью характеристики* х.х. Нисходящая и восходящая ветви характеристики х.х. образуют петлю намагничивания. Проведя между кривыми *2* и *3* среднюю линию *4,* получим расчетную характеристику х.х.

Прямолинейная часть характеристики х.х. соответствует ненасыщенной магнитной системе машины. При дальнейшем увеличении тока сталь машины насыщается и характеристика приобретает криволинейный характер. Зависимость $U_0 = f(I_B)$ повторяет в другом масштабе магнитную характеристику машины и дает возможность судить о магнитных свойствах машины.

Нагрузочная характеристика генератора. Эта характеристика выражает зависимость напряжения U на выходе генератора от тока возбуждения I_B при неизменных токе нагрузки, например номинальном, и частоте вращения. При указанных условиях напряжение на выводах генератора меньше ЭДС [см. (5.1)], поэтому нагрузочная характеристика *1* располагается ниже характеристики холостого хода *2* (рис. 5.3). Если из точки *a,* соответствующей номинальному напряжению $U_{ном}$, отложить вверх отрезок *ab,* равный $I_a \sum r$, и провести горизонтально отрезок *bc* до пересечения с характеристикой х.х., а затем соединить точки *a* и *c*, то получим *abc — треугольник реактивный (характеристический).*

Так, при работе генератора в режиме х.х. при токе возбуждения $I_{B1} = I_{B.ном}$ напряжение на выводах $U_0 = de$; с подключением нагрузки (при неизменном токе возбуждения) напряжение

генератора снизится до значения $U_{ном} = ae$. Таким образом, отрезок *da* выражает значение напряжения $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{B1} = I_{B.ном}$. Напряжение на выводах генератора в этом случае уменьшилось в результате действия двух причин: падения напряжения в цепи якоря [см. (5.1)] и размагничивающего влияния реакции якоря . Измерив значение сопротивления цепи якоря и подсчитав падение напряжения $I_a \sum r$, можно определить ЭДС генератора при заданном токе нагрузки: $E_a = U + I_a \sum r$. На рис. 5.3 эта ЭДС представлена отрезком *be.* Электродвижущая сила генератора при нагрузке меньше, чем в режиме х.х. (*be* < *de),* что объясняется размагничивающим влиянием реакции якоря. Для количественной оценки этого влияния из точки *c* опускаем перпендикуляр на ось абсцисс. Полученный отрезок *cf* представляет собой ЭДС генератора при нагрузке; в режиме х.х. для создания этой ЭДС необходим ток возбуждения $I_{B2} < I_{B1}$. Следовательно, отрезок *fe,* равный разности токов возбуждения $I_{B1} - I_{B2}$, представляет собой ток возбуждения, компенсирующий размагничивающее влияние реакции якоря.

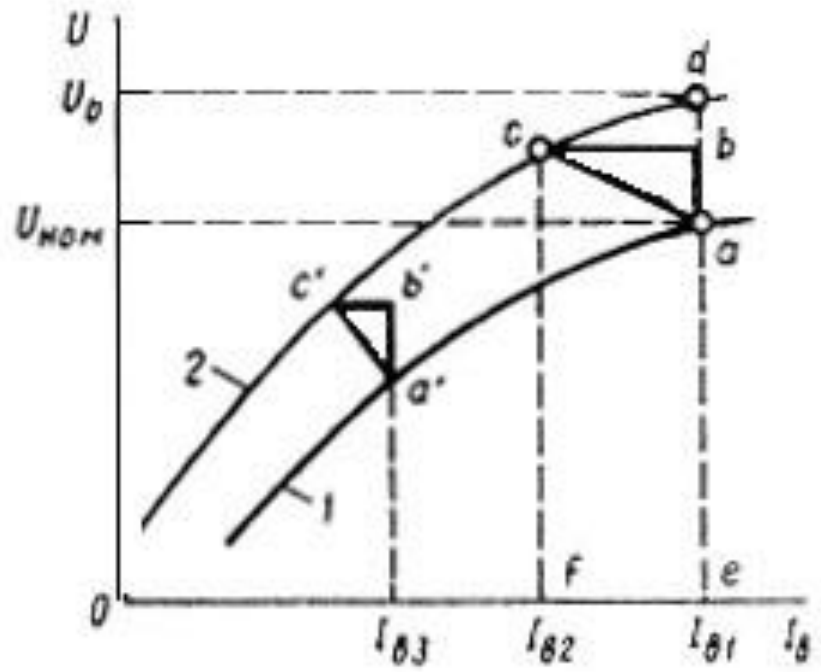


Рис. 5.3. Нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения

Катеты реактивного треугольника количественно определяют причины, вызывающие уменьшение напряжения генератора при его нагрузке: падение напряжения в цепи якоря определяет катет

$$ab = I_a \sum r \qquad (5.7)$$

ток возбуждения $I_{B1} - I_{B2}$, компенсирующий размагничивающее действие реакции якоря, определяет катет

$$bc = I_{B1} - I_{B2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2\omega_{B.K}}, \qquad (5.8)$$

где F_{qd} и F_{ad} — величины, определяющие размагничивающее действие реакции якоря по поперечной и продольной осям; $\omega_{B.K}$ —число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения.

Реактивный треугольник $a'b'c'$ построен для другого значения тока возбуждения I_{B3}. Сторона $a'b'$ треугольника осталась неизменной $(a'b' = ab)$, что объясняется неизменностью тока нагрузки, но сторона $b'c'$ уменьшилась $(b'c' < bc)$, так как при меньшем токе возбуждения *уменьшилась* степень насыщения магнитной цепи генератора, а следовательно, и размагничивающее действие реакции якоря.

Внешняя характеристика генератора. Эта характеристика представляет собой зависимость напряжения U на выводах генератора от тока нагрузки I. При снятии данных для построения внешней характеристики генератор приводят во вращение с номинальной скоростью и нагружают его до номинального тока при номинальном напряжении. Затем, постепенно уменьшая нагрузку вплоть до х.х. ($I = 0$), снимают показания приборов. Сопротивление цепи возбуждения r_B и частоту вращения в течение опыта поддерживают неизменными.

На рис. 5.4, *а* представлена внешняя характеристика генератора независимого возбуждения, из которой видно, что при увеличении тока нагрузки I напряжение на выводах генератора понижается; это объясняется размагничивающим влиянием реакции якоря и падением напряжения в цепи якоря. Наклон внешней характеристики к оси абсцисс (жесткость внешней характеристики) оценивается *номинальным изменением напряжения генератора при сбросе нагрузки:*

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (5.9)$$

Обычно для генератора независимого возбуждения $\Delta U_{ном} = 5 \div 10\%$.

Регулировочная характеристика генератора. Характеристика $I_B = f(I)$ показывает, как следует менять ток в цепи возбуждения, чтобы при изменениях нагрузки генератора напряжение на его выводах оставалось неизменным, равным номинальному. При этом частота вращения сохраняется постоянной $(n = const)$.

При работе генератора без нагрузки в цепи возбуждения устанавливают ток I_{B0}, при котором напряжение на выводах генератора становится равным номинальному. Затем постепенно увеличивают нагрузку генератора, одновременно повышают ток возбуждения таким образом, чтобы напряжение генератора во всем диапазоне нагрузок оставалось равным номинальному. Так получают восходящую ветвь характеристики (кривая *1* на рис. 5.4, *б*). Постепенно уменьшая нагрузку генератора до х.х. и регулируя соответствующим образом ток возбуждения, получают нисходящую ветвь характеристики (кривая *2* на рис. 5.4, *б*). Нисходящая ветвь регулировочной характеристики расположена ниже восходящей, что объясняется влиянием возросшего остаточного намагничивания магнитной цепи машины в процессе снятия восходящей ветви. Среднюю кривую *3,* проведенную между восходящей и нисходящей ветвями, называют *практической регулировочной характеристикой генератора.*

Основной недостаток генераторов независимого возбуждения — это необходимость в постороннем источнике энергии постоянного тока — возбудителе. Однако возможность регулирования напряжения в широких пределах, а также сравнительно жесткая внешняя характеристика этого генератора являются его достоинствами.

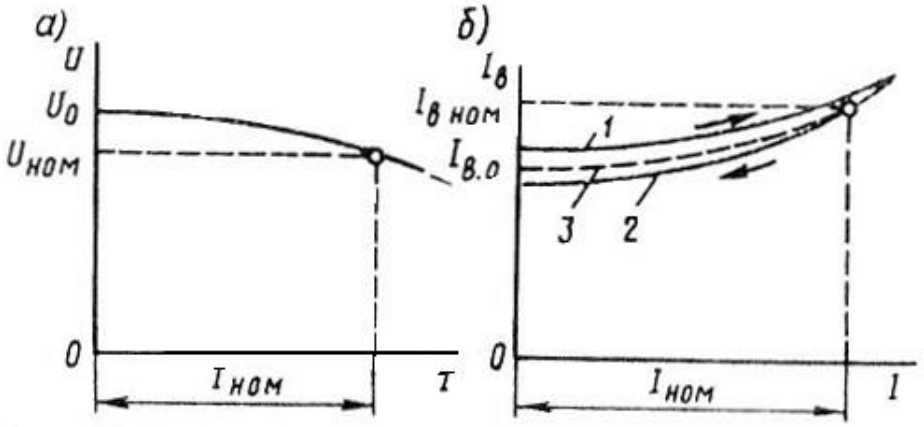


Рис. 5.4. Внешняя *(а)* и регулировочная *(б)* характеристики генератора независимого возбуждения

5.3. Генератор параллельного возбуждения

Принцип самовозбуждения генератора постоянного тока основан на том, что магнитная система машины, будучи намагниченной, сохраняет длительное время небольшой магнитный поток остаточного магнетизма сердечников полюсов и станины $\Phi_{ост}$ (порядка 2—3% от полного потока). При вращении якоря поток индуцирует в якорной обмотке ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в обмотке возбуждения возникает небольшой ток $I_{в.ост}$. Если МДС обмотки возбуждения $I_{в.ост}w_В$ имеет такое же направление, как и поток $\Phi_{ост}$, то она увеличивает поток главных полюсов. Это, в свою очередь, вызывает увеличение ЭДС генератора, отчего ток возбуждения вновь увеличится.

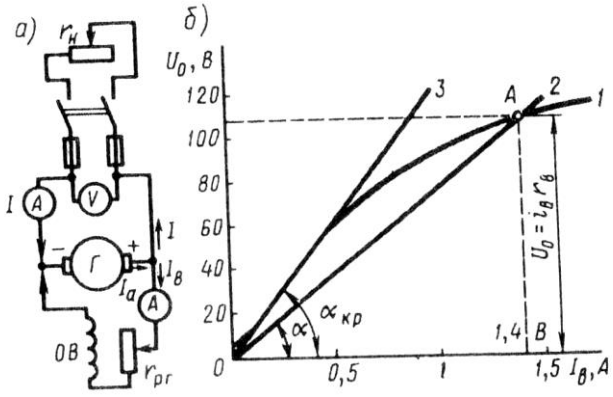


Рис. 5.5. Принципиальная схема (а) и характеристика х.х. (б) генератора параллельного возбуждения

Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора не будет уравновешено падением напряжения в цепи возбуждения, т. е. $I_В r_В = U_0$.

На рис. 5.5, *а* показана схема включения генератора параллельного возбуждения, на рис. 28.5, *б* — характеристика х.х. генератора (кривая *1*) и зависимость падения напряжения от тока возбуждения $I_В r_В = f(I_В)$ (прямая *2*). Точка пересечения *А* соответствует окончанию процесса самовозбуждения, так как именно в ней $U_0 = I_В r_В$.

Угол наклона прямой *ОА* к оси абсцисс определяется из треугольника *ОАВ:*

$$\frac{m_u}{m_i} tg\alpha = \frac{U_0}{I_В} = r_В, \qquad (5.10)$$

где m_i — масштаб тока (по оси абсцисс), А/мм; m_u — масштаб напряжения (по оси ординат), В/мм.

Из (5.10) следует, что угол наклона прямой $I_B r_B = f(I_B)$ к оси абсцисс прямо пропорционален сопротивлению цепи возбуждения. Однако при некотором значении сопротивления реостата $r_{рг}$ сопротивление r_B, достигает значения, при котором зависимость $I_B r_B = f(I_B)$ становится касательной к прямолинейной части характеристики х.х. (прямая *3*). В этих условиях генератор не самовозбуждается. Сопротивление цепи возбуждения, при которой прекращается самовозбуждение генератора, называют *критическим* сопротивлением, $(r_{в.крит})$.

Следует отметить, что самовозбуждение генератора возможно лишь при частоте вращения, превышающей критическую $n_{кт}$. Это условие вытекает из *характеристики самовозбуждения генератора* (рис. 5.6), представляющей собой зависимость напряжения генератора в режиме х.х. от частоты вращения при неизменном сопротивлении цепи возбуждения, т. е. $U_0 = f(n)$ при $r_B = const$.

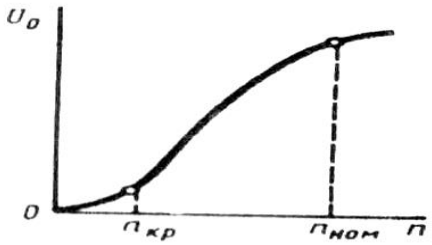


Рис. 5.6. Характеристика самовозбуждения

Анализ характеристики самовозбуждения показывает, что при $n < n_{кр}$ увеличение частоты вращения якоря генератора сопровождается незначительным увеличением напряжения, так как процесса самовозбуждения нет и появление напряжения на выходе генератора обусловлено лишь остаточным намагничиванием магнитной цепи генератора. Процесс самовозбуждения начинается при $n > n_{кр}$. В этом случае увеличение частоты вращения сопровождается резким ростом напряжения U_0. Однако при частоте вращения, близкой к номинальной, рост напряжения несколько замедляется, что объясняется магнитным насыщением генератора. Критическая частота вращения зависит от сопротивления цепи возбуждения и с ростом последнего увеличивается.

Таким образом, самовозбуждение генераторов постоянного тока возможно при соблюдении следующих условий: а) магнитная система машины должна обладать остаточным магнетизмом; б) присоединение обмотки возбуждения должно быть таким, чтобы МДС обмотки совпадала по направлению с потоком остаточного магнетизма $Ф_{ост}$; в) сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического; г) частота вращения якоря должна быть больше критической.

Так как генератор параллельного возбуждения самовозбуждается лишь в одном направлении, то и характеристика х.х. этого генератора может быть снята только для одного квадранта осей координат.

Нагрузочная и *регулировочная* характеристики генератора параллельного возбуждения практически не отличаются от соответствующих характеристик генератора независимого возбуждения. *Внешняя характеристика* генератора параллельного возбуждения *1* (рис. 5.7) менее жесткая, чем у генератора независимого возбуждения. Объясняется это тем, что в генераторе параллельного возбуждения помимо причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в

цепи якоря), действует еще и третья причина — уменьшение тока возбуждения, вызванное снижением напряжения от действия первых двух причин. Этим же объясняется и то, что при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки $r_н$ ток увеличивается лишь до критического значения $I_{кр}$, а затем при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки ток начинает уменьшаться. Наконец, ток нагрузки при коротком замыкании $I_к < I_{кр}$. Дело в том, что с увеличением тока усиливается размагничивание генератора (усиление реакции якоря и уменьшение тока возбуждения), машина переходит в *ненасыщенное* состояние, при котором даже небольшое уменьшение сопротивления нагрузки вызывает резкое уменьшение ЭДС машины (см. рис. 5.5, *б*). Так как ток определяется напряжением на выводах генератора U и сопротивлением нагрузки $r_н$, т. е. $I = U / r_н$, то при токах нагрузки $I < I_{кр}$, когда напряжение генератора уменьшается медленнее, чем убывает сопротивление нагрузки, происходит рост тока нагрузки. После того как $I = I_{кр}$, дальнейшее уменьшение $r_н$ сопровождается уменьшением тока нагрузки, так как в этом случае напряжение U убывает быстрее, чем уменьшается сопротивление нагрузки $r_н$.

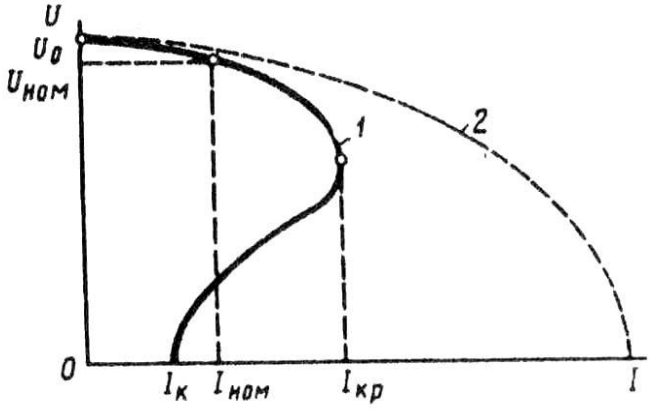


Рис. 5.7. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Таким образом, короткое замыкание, вызванное медленным уменьшением сопротивления нагрузки, не опасно для генератора параллельного возбуждения. Но при внезапном к.з. магнитная система генератора не успевает размагнититься и ток $I_к$ достигает опасных для машины значений $I_к = (8 \div 12) I_{ном}$ (кривая *2*). При таком резком возрастании тока нагрузки на валу генератора возникает значительный тормозящий момент [см. (5.24)], а на коллекторе появляется сильное искрение, переходящее в круговой огонь. Поэтому необходимо защищать генератор от перегрузки и к.з. посредством плавких предохранителей или же применением релейной защиты.

Генераторы параллельного возбуждения широко применяют в установках постоянного тока, так как отсутствие возбудителя выгодно отличает эти генераторы от генераторов независимого возбуждения. Номинальное изменение напряжения генератора параллельного возбуждения [см. (5.9)] составляет 10—30%.

5.4. Генератор смешанного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения (рис. 5.8, *а*) имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения. Поток возбуждения создается в основном параллельной обмоткой. Последовательная обмотка обычно включается *согласно* с параллельной (чтобы МДС обмоток складывались), что обеспечивает получение жесткой внешней характеристики генератора.

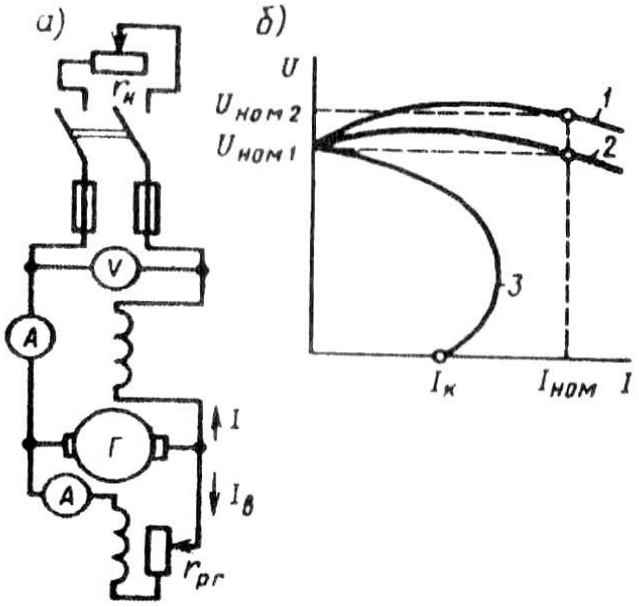


Рис. 5.8. Схема включения генератора смешанного возбуждения (*а*) и его внешние характеристики (*б*)

В режиме х.х. генератор имеет только параллельное возбуждение, так как $I = 0$. С появлением нагрузки возникает МДС последовательной обмотки возбуждения, которая, подмагничивая машину, компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в якоре.

Внешняя характеристика в этом случае становится наиболее жесткой (рис. 5.8, *б,* кривая *2*), т. е. напряжение на зажимах генератора при увеличении тока остается почти неизменным. Если же требуется, чтобы напряжение на зажимах потребителя (в конце линии) оставалось практически неизменным, то число витков последовательной обмотки увеличивают так, чтобы МДС этой обмотки компенсировала еще и падение напряжения в проводах линии (кривая /).

При *встречном* включении обмоток возбуждения напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается (кривая *3*), что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, МДС которой направлена против МДС параллельной обмотки. Встречное включение обмоток применяют лишь в генераторах специального назначения, например в сварочных, где необходимо получить круто падающую внешнюю характеристику.

Генераторы смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения применяют для питания силовой нагрузки в случаях, когда требуется постоянство напряжения в линии.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики определяют свойства генераторов постоянного тока?
2. Почему у генератора параллельного возбуждения изменение напряжения при сбросе нагрузки больше, чем у генератора независимого возбуждения?
3. Каковы условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?

При каком включении обмоток возбуждения генератора смешанного возбуждения внешняя характеристика.

Глава YI. Работа коллекторных машин постоянного тока в режиме двигателя.

6.1. Основные понятия

Коллекторные машины обладают свойством обратимости, т. е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому если машину постоянного тока подключить к источнику энергии постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появятся токи. Взаимодействие тока якоря с полем возбуждения создает на якоре электромагнитный момент *M,* который является не тормозящим, как это имело место в генераторе, а *вращающим.*

Под действием электромагнитного момента якоря машина начнет вращаться, т. е. машина будет работать в режиме двигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую. В процессе работы двигателя его якорь вращается в магнитном поле. В обмотке якоря индуцируется ЭДС E_a, направление которой можно определить по правилу «правой руки». По своей природе она не отличается от ЭДС, наводимой в обмотке якоря генератора. В двигателе же ЭДС направлена против тока I_a, и поэтому ее называют *противоэлектродвижущей* силой (противо-ЭДС) якоря (рис. 6.1).

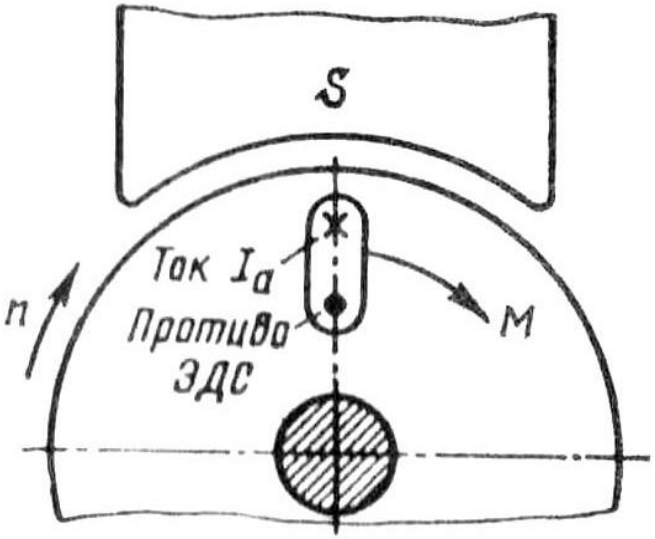


Рис. 6.1. Направление противо-ЭДС в обмотке якоря двигателя

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения,

$$U = E_a + I_a \sum r . \qquad (6.1)$$

Из (6.1) следует, что подведенное к двигателю напряжение уравновешивается противо-ЭДС обмотки якоря и падением напряжения в цепи якоря. На основании (29.1) ток якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r} . \qquad (6.2)$$

Умножив обе части уравнения (29.1) на ток якоря I_a, получим *уравнение мощности для цепи якоря:*

$$UI_a = I_a^2 \sum r + E_a I_a , \qquad (6.3)$$

где UI_a — мощность в цепи обмотки якоря; $I_a^2 \sum r$ — мощность электрических потерь в цепи якоря.

Для выяснения сущности выражения $E_a I_a$ проделаем следующее преобразование:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a ,$$

или

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega .$$

Но, согласно (6.24),

$$\left[pN/(2\pi a)\right]\Phi I_a = M$$

тогда

$$E_a I_a = M\omega = P_{ЭМ} , \qquad (6.4)$$

где $\omega = 2\pi n/60$ — угловая частота вращения якоря; $P_{ЭМ}$ — электромагнитная мощность двигателя.

Следовательно, выражение $E_a I_a$ представляет собой *электромагнитную мощность двигателя.*

Преобразовав выражение (6.3) с учетом (6.4), получим

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum r .$$

Анализ этого уравнения показывает, что с увеличением нагрузки на вал двигателя, т. е. с увеличением электромагнитного момента *M,* возрастает мощность в цепи обмотки якоря UI_a, т. е. мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным $(U = const)$, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a.

В зависимости от способа возбуждения двигатели постоянного тока, так же как и генераторы, разделяют на двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические) и с электромагнитным возбуждением. Последние в соответствии со схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря подразделяют на двигатели параллельного (шунтовые), последовательного (сериесные) и смешанного (компаундные) возбуждения.

В соответствии с формулой ЭДС $E_a = c_e \Phi n$ частота вращения двигателя (об/мин)

$$n = E_a /(c_e \Phi) .$$

Подставив значение E_a из (6.1), получим (об/мин)

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi} , \qquad (6.5)$$

т. е. *частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения.* Физически это объясняется тем, что повышение напряжения *U* или уменьшение потока *Ф* вызывает увеличение разности $(U - E_a)$*;* это, в свою очередь, ведет к росту тока I_a [см. (6.2)]. Вследствие этого возросший ток повышает вращающий момент, и если при этом нагрузочный момент остается неизменным, то частота вращения двигателя увеличивается.

Из (6.5) следует, что регулировать частоту вращения двигателя можно изменением либо напряжения *U,* подводимого к двигателю, либо основного магнитного потока *Ф*, либо электрического сопротивления в цепи якоря $\sum r$.

Направление вращения якоря зависит от направлений магнитного потока возбуждения *Ф* и тока в обмотке якоря. Поэтому, изменив направление какой-либо из указанных величин, можно изменить направление вращения якоря. Следует иметь в виду, что переключение общих зажимов схемы у рубильника не дает изменения направления вращения якоря, так как при этом одновременно изменяется направление тока и в обмотке якоря, и в обмотке возбуждения.

6.2. Пуск двигателя

Ток якоря двигателя определяется формулой (6.2). Если принять *U* и $\sum r$ неизменными, то ток I_a зависит от противо-ЭДС E_a. Наибольшего значения ток I_a достигает при пуске

двигателя в ход. В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен $(n = 0)$ и в его обмотке не индуцируется ЭДС $(E_a = 0)$. Поэтому при непосредственном подключении двигателя к сети в обмотке его якоря возникает пусковой ток

$$I'_a = U / \sum r . \qquad (6.6)$$

Обычно сопротивление $\sum r$ невелико, поэтому значение пускового тока достигает недопустимо больших значений, в 10—20 раз превышающих номинальный ток двигателя.

Такой большой пусковой ток весьма опасен для двигателя. Во-первых, он может вызвать в машине круговой огонь, а во-вторых, при таком токе в двигателе развивается чрезмерно большой пусковой момент, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может механически их разрушить. И наконец, этот ток вызывает резкое падение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей, включенных в эту сеть. Поэтому пуск двигателя непосредственным подключением в сеть (безреостатный пуск) обычно применяют для двигателей мощностью не более 0,7—1,0 кВт. В этих двигателях благодаря повышенному сопротивлению обмотки якоря и небольшим вращающимся массам значение пускового тока лишь в 3—5 раз превышает номинальный, что не представляет опасности для двигателя. Что же касается двигателей большей мощности, то при их пуске для ограничения пускового тока используют *пусковые реостаты* (ПР), включаемые последовательно в цепь якоря (реостатный пуск).

Перед пуском двигателя необходимо рычаг *Р* реостата поставить на холостой контакт *О* (рис. 6.2). Затем включают рубильник, переводят рычаг на первый промежуточный контакт *1* и цепь якоря двигателя оказывается подключенной к сети через наибольшее сопротивление реостата $r_{n.p} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$.

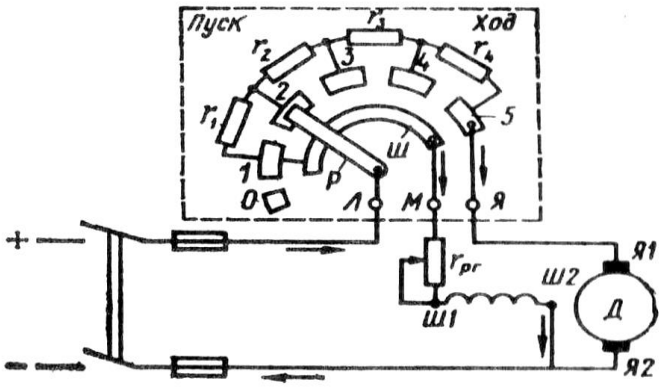


Рис. 6.2. Схема включения пускового реостата

Одновременно через рычаг *Р* и шину *Ш* к сети подключается обмотка возбуждения, ток в которой в течение всего периода пуска не зависит от положения рычага *Р,* так как сопротивление шины по сравнению с сопротивлением обмотки возбуждения пренебрежимо мало.

Пусковой ток якоря при полном сопротивлении пускового реостата

$$I_n = \frac{U - E_a}{\sum r + r_{n.p}} . \qquad (6.7)$$

С появлением тока в цепи якоря $I_{n\max}$ возникает пусковой момент $M_{n\max}$, под действием которого начинается вращение якоря. По мере нарастания частоты вращения увеличивается противо-ЭДС $E_a = c_e \Phi n$, что ведет к уменьшению пускового тока и пускового момента.

По мере разгона якоря двигателя рычаг пускового реостата переключают в положения 2, 3 и т. д. В положении 5 рычага реостата пуск двигателя заканчивается $(r_{n.p} = 0)$. Сопротивление пускового реостата выбирают обычно таким, чтобы наибольший пусковой ток превышал номинальный не более чем в 2—3 раза.

Так как вращающий момент двигателя *M* прямо пропорционален потоку *Ф*, то для облегчения пуска двигателя параллельного и смешанного возбуждения сопротивление реостата в цепи возбуждения $r_{рг}$ следует полностью вывести $(r_{рг} = 0)$. Поток возбуждения *Ф* в этом случае получает наибольшее значение и двигатель развивает необходимый вращающий момент при меньшем токе якоря.

Для пуска двигателей большей мощности применять пусковые реостаты нецелесообразно, так как это вызвало бы значительные потери энергии. Кроме того, пусковые реостаты были бы громоздкими. Поэтому в двигателях большой мощности применяют безреостатный пуск двигателя путем понижения напряжения. Примерами этого являются пуск тяговых двигателей электровоза переключением их с последовательного соединения при пуске на параллельное при нормальной работе или пуск двигателя в схеме «генератор—двигатель».

6.3. Двигатель параллельного возбуждения

Схема включения в сеть двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 6.3, *а*. Характерной особенностью этого двигателя является то, что ток в обмотке возбуждения (ОВ) не зависит от тока нагрузки (тока якоря). Реостат в цепи возбуждения $r_{рг}$ служит для регулирования тока в обмотке возбуждения и магнитного потока главных полюсов.

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его *рабочими характеристиками,* под которыми понимают зависимость частоты вращения *n*, тока *I*, полезного момента M_2, вращающего момента *M* от мощности на валу двигателя P_2 при $U = const$ и $I_B = const$ (рис. 6.3, *б*).

Для анализа зависимости и $n = f(P_2)$, которую обычно называют скоростной характеристикой, обратимся к формуле (6.5), из которой видно, что при неизменном напряжении *U* на частоту вращения влияют два фактора: падение напряжения в цепи якоря $I_a \sum r$ и поток возбуждения *Ф*. При увеличении нагрузки уменьшается числитель $(U - I_a \sum r)$, при этом вследствие реакции якоря уменьшается и знаменатель *Ф*. Обычно ослабление потока, вызванное реакцией якоря, невелико и первый фактор влияет на частоту вращения сильнее, чем второй. В итоге частота вращения двигателя с ростом нагрузки P_2 уменьшается, а график $n = f(P_2)$ приобретает падающий вид с небольшой выпуклостью, обращенной к оси абсцисс. Если же реакция якоря в двигателе сопровождается более значительным ослаблением потока *Ф*, то частота вращения с увеличением нагрузки будет возрастать, как это показано штриховой кривой на рис. 6.3, *б.* Однако такая зависимость $n = f(P_2)$ является нежелательной, так как она, как правило, не удовлетворяет условию устойчивой работы двигателя: с ростом нагрузки на двигатель возрастает частота вращения, что ведет к дополнительному росту нагрузки и т. д., т. е. частота вращения *n* двигателя неограниченно увеличивается и двигатель идет «в разнос». Чтобы обеспечить характеристике частоты вращения форму падающей кривой, в некоторых двигателях параллельного возбуждения применяют легкую (с небольшим числом витков) последовательную обмотку возбуждения, которую называют *стабилизирующей обмоткой.* При включении этой обмотки согласованно с параллельной обмоткой возбуждения ее МДС компенсирует размагничивающее действие реакции якоря так, что поток *Ф* во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменным.

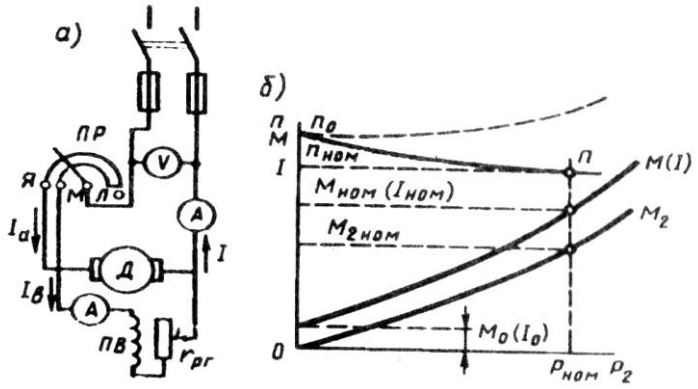


Рис. 6.3. Схема двигателя параллельного возбуждения ($а$) и его рабочие характеристики ($б$)

Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к х.х., выраженное в процентах, называют *номинальным изменением частоты вращения:*

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100, \qquad (6.8)$$

где n_0 — частота вращения двигателя в режиме х.х.

Обычно для двигателей параллельного возбуждения $\Delta n_{ном} = 2 \div 8\%$, поэтому характеристику частоты вращения двигателя параллельного возбуждения называют *жесткой.*

Зависимость полезного момента $M2$ от нагрузки установлена формулой $M_2 = 9{,}55P_2 / n$. При $n = const$ график $M_2 = f(P_2)$ имел бы вид прямой. Однако с увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается, и поэтому зависимость $M_2 = f(P_2)$ криволинейна.

При $n = const$ вращающий момент двигателя $M = M_0 + M_2$. Так как рабочие характеристики двигателя строят при условии $I_B = const$, что обеспечивает постоянство магнитных потерь в двигателе, то момент х.х. $M_0 = const$. Поэтому график зависимости $M = f(P_2)$ проходит параллельно кривой $M_2 = f(P_2)$ Если принять поток $\Phi = const$, то график $M_2 = f(P_2)$ является в то же время выражением зависимости $I = f(P_2)$,так как $M = c_M \Phi I_a$.

Для получения аналитического выражения *механической характеристики* $n = f(M)$ преобразуем выражение (6.5):

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum r}{c_e \Phi}; \qquad (6.9)$$

подставив в него из (25.24) значение тока якоря

$$I_a = M /(c_M \Phi), \qquad (6.10)$$

получим

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum r}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \qquad (6.11)$$

где n_0 — частота вращения в режиме х.х.; Δn — изменение частоты вращения, вызванное изменением нагрузки на валу двигателя.

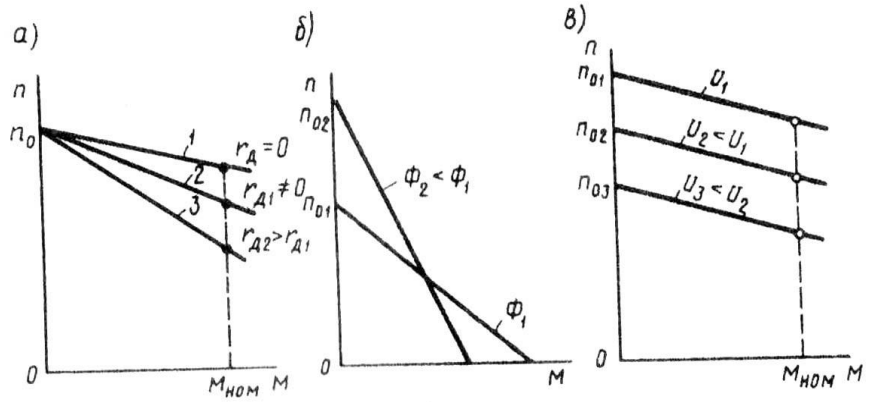


Рис. 6.4. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения:
а — при введении в цепь якоря добавочного сопротивления;
б — при изменении основного магнитного потока;
в — при изменении напряжения в цепи якоря

Если пренебречь реакцией якоря, то (так как $I_В = const$) можно принять $Ф = const$. Тогда механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет собой прямую линию, несколько наклоненную к оси абсцисс (рис. 6.4, *а*). Угол наклона механической характеристики тем больше, чем больше значение сопротивления, включенного в цепь якоря. Механическую характеристику двигателя при отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря называют *естественной* (прямая *1*). Механические характеристики двигателя, полученные при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря, называют *искусственными* (прямые *2* и *3*).

Вид механической характеристики зависит также и от значения основного магнитного потока *Ф*. Так, при уменьшении *Ф* увеличивается частота вращения х.х. n_0 и одновременно увеличивается Δn, т. е. увеличиваются оба слагаемых уравнения (6.11). Это приводит к резкому увеличению наклона механической характеристики, т. е. к уменьшению ее жесткости (рис. 6.4, *б*).

При изменении напряжения на якоре *U* меняется частота вращения n_0, а n_0 остается неизменной. В итоге жесткость механической характеристики (если пренебречь влиянием реакции якоря) не меняется (рис. 6.4, *в*), т. е. характеристики смещаются по высоте, оставаясь параллельными друг другу.

6.4. Регулирование частоты вращения двигателей параллельного возбуждения

Способы регулирования частоты вращения двигателей оцениваются следующими показателями: плавностью регулирования; диапазоном регулирования, определяемым отношением наибольшей частоты вращения к наименьшей; экономичностью регулирования, определяемой стоимостью регулирующей аппаратуры и потерями электроэнергии в ней.

Из (29.5) следует, что регулировать частоту вращения двигателя параллельного возбуждения можно изменением сопротивления в цепи якоря, изменением основного магнитного потока *Ф*, изменением напряжения в цепи якоря.

Введение дополнительного сопротивления в цепь якоря. Дополнительное сопротивление (реостат $r_Д$) включают в цепь якоря аналогично пусковому реостату (ПР). Однако в отличие от последнего оно должно быть рассчитано на продолжительное протекание тока.

При включении сопротивления $r_Д$ в цепь якоря выражение частоты (6.5) принимает вид

$$n = \frac{U - I_a(\sum r + r_Д)}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \qquad (6.12)$$

где $n_0 = U/(c_e\Phi)$ — частота вращения в режиме х.х.;

$\Delta n = I_a(\sum r + r_Д)/(c_e\Phi)$ — изменение частоты вращения, вызванное падением напряжения в цепи якоря.

С увеличением $r_Д$ возрастает Δn, что ведет к уменьшению частоты вращения. Зависимость $n = f(r_Д)$ иллюстрируется также и механическими характеристиками двигателя параллельного возбуждения (рис. 6.4, *а*): с повышением $r_Д$ увеличивается наклон механических характеристик, а частота вращения при заданной нагрузке на валу $(M = M_{ном})$ уменьшается. Этот способ обеспечивает плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне (только в сторону уменьшения частоты от номинальной), однако он неэкономичен из-за значительных потерь электроэнергии в регулировочном реостате $(I_a^2 r_Д)$, которые интенсивно растут с увеличением мощности двигателя.

Изменение основного магнитного потока. Этот способ регулирования в двигателе параллельного возбуждения реализуется посредством реостата $r_{рг}$ в цепи обмотки возбуждения (см. рис. 6.3, *а*). Так, при уменьшении сопротивления реостата возрастает магнитный поток обмотки возбуждения, что сопровождается понижением частоты вращения [см. (29.5)]. При увеличении $r_{рг}$ частота вращения растет. Зависимость частоты вращения от тока возбуждения выражается *регулировочной характеристикой* двигателя $n = f(I_B)$ при $I = const$ и $U = const$.

Из выражения (6.5) следует, что с уменьшением магнитного потока Φ частота вращения n увеличивается по гиперболическому закону (рис. 6.5, a). Но одновременно уменьшение Φ ведет к росту тока якоря $I_a = M/(c_M\Phi)$. При потоке $\Phi = \Phi'$ ток якоря достигает значения $I'_a = U/(2\sum r)$, т. е. падение напряжения в цепи якоря достигает значения, равного половине напряжения, подведенного к якорю $(I'_a \sum r = U/2)$. В этих условиях частота вращения двигателя достигает максимума n_{max}. При дальнейшем уменьшении потока $(\Phi < \Phi')$ частота вращения двигателя начинает убывать, так как из-за интенсивного роста тока I_a второе слагаемое выражения (6.9) нарастает быстрее первого.

При небольшом нагрузочном моменте на валу двигателя максимальная частота вращения n_{max} во много раз превосходит номинальную частоту вращения двигателя $n_{ном}$ и является недопустимой по условиям механической прочности двигателя, т. е. может привести к его «разносу». Учитывая это, при выборе реостата $r_{рг}$ необходимо следить за тем, чтобы при полностью введенном его сопротивлении частота вращения двигателя не превысила допустимого значения.

Например, для двигателей серии 2П допускается превышение частоты вращения над номинальной не более чем в 2—3 раза. Необходимо также следить за надежностью электрических соединений в цепи обмотки возбуждения двигателя, так как при разрыве этой цепи магнитный поток уменьшается до значения потока остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$, при котором частота вращения может достигнуть опасного значения.

Вид регулировочных характеристик $n = f(\Phi)$ зависит от значения нагрузочного момента M_2 на валу двигателя: с ростом M_2 максимальная частота вращения n_{max} уменьшается (рис. 6.5, *б*). Недостаток рассмотренного способа регулирования частоты вращения состоит в том, что при изменении магнитного потока Φ меняется угол наклона механической характеристики двигателя. Рассмотренный способ регулирования частоты вращения прост и экономичен, так как в двигателях параллельного возбуждения ток $I_B = (0{,}01 \div 0{,}07) I_a$, а поэтому потери в

регулировочном реостате ($I_B^2 r_{рг}$) невелики.

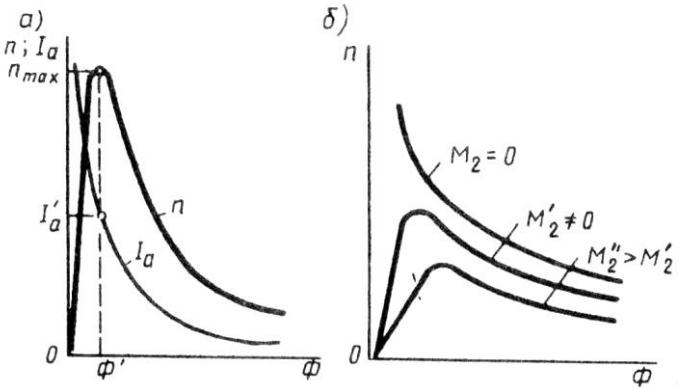


Рис. 6.5. Регулировочные характеристики двигателя параллельного возбуждения

Однако диапазон регулирования обычно составляет $n_{max} / n_{min} = 2 \div 5$. Объясняется это тем, что нижний предел частоты вращения обусловлен насыщением машины, ограничивающим значение магнитного потока *Ф*, а верхний предел частоты опасностью «разноса» двигателя и усилением влияния реакции якоря, искажающее действие которого при ослаблении основною магнитного потока *Ф* усиливается и ведет к искрению на коллекторе или же к появлению кругового огня .

Изменение напряжения в цепи якоря. Регулирование частоты вращения двигателя изменением питающего напряжения применяется лишь при $I_B = const$, т. е. при раздельном питании цепей обмотки якоря и обмотки возбуждения при независимом возбуждении.

Частота вращения в режиме х.х. n_0 пропорциональна напряжению, а Δn от напряжения не зависит [см. (6.1 1)], поэтому механические характеристики двигателя при изменении напряжения не меняют угла наклона к оси абсцисс, а смещаются по высоте, оставаясь параллельными друг другу (см. рис. 6.4, *в*). Для осуществления этого способа регулирования необходимо цепь якоря двигателя подключить к источнику питания с регулируемым напряжением. Для управления двигателями малой и средней мощности в качестве такого источника можно применить регулируемый выпрямитель, в котором напряжение постоянного тока меняется регулировочным автотрансформатором (АТ), включенным на входе выпрямителя (рис. 6.6, *а*).

Для управления двигателями большой мощности целесообразно применять генератор постоянного тока независимого возбуждения; привод осуществляется посредством приводного двигателя (ПД), в качестве которого обычно используют трехфазный двигатель переменного тока. Для питания постоянным током цепей возбуждения генератора *Г* и двигателя *Д* используется возбудитель *В* — генератор постоянного тока, напряжение на выходе которого поддерживается неизменным. Описанная схема управления двигателем постоянного тока (рис. 6.6, *б*) известна под названием системы «генератор — двигатель» *(Г—Д)*.

Изменение напряжения в цепи якоря позволяет регулировать частоту вращения двигателя вниз от номинальной, так как напряжение свыше номинального недопустимо. При необходимости регулировать частоту вращения вверх от номинальной можно воспользоваться изменением тока возбуждения двигателя. Изменение направления вращения (реверс) двигателя, работающего по системе *Г—Д,* осуществляется изменением направления тока в цепи возбуждения генератора *Г* переключателем *П,* т. е. переменой полярности напряжения на его зажимах. Если двигатель постоянного тока работает в условиях резко переменной нагрузки, то для смягчения колебаний мощности потребляемой ПД из трехфазной сети, на вал ПД помещают маховик *М,* который запасает энергию в период уменьшения нагрузки на двигатель *Д* и отдает ее в период интенсивной нагрузки двигателя.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения в цепи якоря обеспечивает плавное экономичное регулирование в широком диапазоне $n_{max} / n_{min} \geq 25$. Наибольшая частота

вращения здесь ограничивается условиями коммутации, а наименьшая — условиями охлаждения двигателя.

Еще одним достоинством рассматриваемого способа регулирования является то, что он допускает безреостатный пуск двигателя при пониженном напряжении.

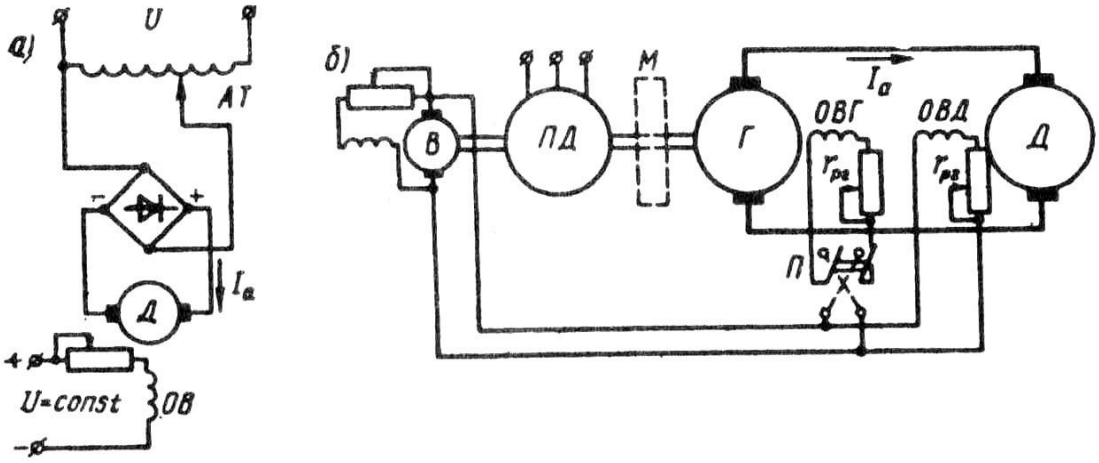


Рис. 6.6. Схемы включения двигателей постоянного тока при регулировании частоты вращения изменением напряжения в цепи якоря

Еще одним достоинством рассматриваемого способа регулирования является то, что он допускает безреостатный пуск двигателя при пониженном напряжении.

Импульсное регулирование частоты вращения. Сущность этого способа регулирования иллюстрируется схемой, изображенной на рис. 6.7, *а*. Цепь обмотки якоря двигателя параллельного (независимого) возбуждения периодически прерывается ключом *К*. Во время замыкания цепи якоря на время t к обмотке якоря подводится напряжение $U = U_{имп}$ и ток в ней достигает значения $I_{a\max}$. Затем ключом *К* цепь якоря размыкают и ток в ней убывает, достигая к моменту следующего замыкания цепи значения $I_{a\min}$ (при размыкании ключа *К* ток в обмотке якоря замыкается через диод *VD*). При следующем замыкании ключа *К* ток достигает значения $I_{a\max}$ и т. д. Таким образом, к обмотке якоря подводится некоторое среднее напряжение

$$U_{ср} = Ut/T = \alpha U , \qquad (6.13)$$

где *Т*-- отрезок времени между двумя следующими друг за другом импульсами напряжения (рис. 6.7, *б*); $\alpha = t/T$ — коэффициент управления.

При этом в обмотке якоря проходит ток, среднее значение которого $I_{acp} = 0{,}5(I_{a\max} + I_{a\min})$.

При импульсном регулировании частота вращения двигателя

$$n = \frac{\alpha U - I_{acp}\sum r}{c_e \Phi} . \qquad (6.14)$$

Таким образом, импульсное регулирование частоты вращения аналогично регулированию изменением подводимого к цепи якоря напряжения. С целью уменьшения пульсаций тока в цепи якоря включена катушка индуктивности (дроссель) L, а частота подачи импульсов равна 200—400 Гц.

На рис. 6.7, *в* представлена одна из возможных схем импульсного регулирования, где в качестве ключа применен управляемый диод — тиристор *VS*. Открывается тиристор подачей кратковременного импульса от генератора импульсов (ГИ) на управляющий электрод (УЭ) тиристора. Цепь L_1C, шунтирующая тиристор, служит для запирания последнего в период между двумя управляющими импульсами. Происходит это следующим образом: при открывании

тиристора конденсатор C перезаряжается через контур L_1C и создает на силовых электродах тиристора напряжение, обратное напряжению сети, которое прекращает протекание тока через тиристор. Параметрами цепи L_1C определяется время (с) открытого состояния тиристора: $t = \pi\sqrt{L_1C}$. Здесь L_1 выражается в генри (Гн); C — в фарадах (Ф).

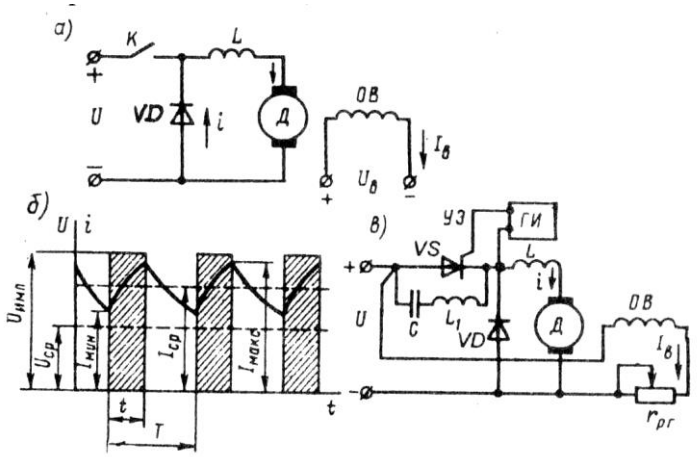


Рис. 6.7. Импульсное регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока

Значение среднего напряжения $U_{ср}$ регулируется изменением частоты следования управляющих импульсов от генератора импульсов на тиристор *VS*.

Жесткие механические характеристики и возможность плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне определили области применения двигателей параллельного возбуждения в станочных приводах, вентиляторах, а также во многих других случаях регулируемого электропривода, где требуется устойчивая работа при колебаниях нагрузки.

6.5. Режимы работы машины постоянного тока

В двигателях параллельного возбуждения при неизменном токе в обмотке возбуждения $(I_B = const)$ магнитный поток изменяется при нагрузке весьма незначительно, поэтому с некоторым приближением можно принять $\Phi = const$. В этом случае электромагнитный момент пропорционален току в цепи якоря и механическая характеристика $n = f(M)$ может быть представлена зависимостью $n = f(I_a)$ (рис. 6.8). Если эту характеристику продолжить в обе стороны за пределы осей координат (прямая *1*), то можно показать, что электрическая машина в зависимости от величины и знака внешнего момента, действующего на ее вал со стороны связанного с ним механизма, может работать в трех режимах: двигательном, тормозном и генераторном.

При работе двигателя без нагрузки ток в цепи якоря I_{a0} небольшой. При этом частота вращения $n = n_0$ (точка *A).* Затем с появлением на валу двигателя нагрузочного момента, противодействующего вращающему, ток в цепи якоря возрастает, а частота вращения уменьшается. Если увеличить противодействующий момент до значения, при котором якорь двигателя остановится (точка *B),* то ЭДС $E_a = 0$ и ток двигателя достигает значения $I_{ак} = U / \sum r$. Если двигатель применяют для привода механизма, нагрузочный момент которого может быть больше вращающегося (например, привод барабана, на который наматывается трос с грузом), то при последующем увеличении нагрузочного момента этого механизма якорь машины вновь начнет вращаться, но теперь уже в другую сторону. Теперь момент, действующий на вал электрической машины со стороны нагрузочного механизма, будет вращающим, а электромагнитный момент машины — тормозящим, т. е. электрическая машина перейдет в тормозной режим. При работе машины в этом режиме ЭДС якоря действует согласованно с напряжением, т. е. $I_a = (U + E_a) / \sum r$. При использовании машины в тормозном режиме

необходимо принять меры для ограничения тока якоря. С этой целью в цепь якоря включают добавочное сопротивление, величина которого обеспечивает получение искусственной характеристики двигателя, пересекающейся с осью абсцисс при токе якоря $I_{аном} < I_{ак}$ (штриховая прямая).

Если при работе двигателя в режиме х.х. к его валу приложить момент, направленный в сторону вращения якоря, то частота вращения, а следовательно, и ЭДС E_a начнут возрастать. Когда ЭДС $E_a = U$, машина не будет потреблять тока из сети (точка С) и частота вращения якоря достигает значения, называемого *пограничной частотой вращения* $n_{х.х.}$

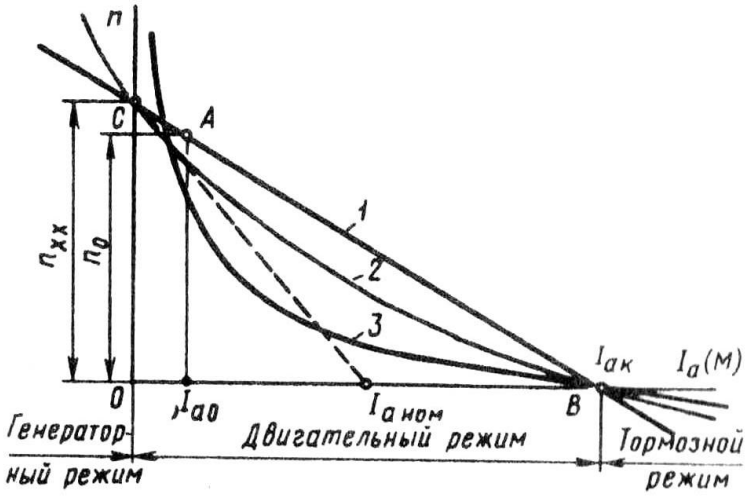


Рис. 6.8. Режимы работы машины постоянного тока:
1 — с параллельным (независимым) возбуждением;
2 — со смешанным возбуждением;
3 — с последовательным возбуждением

При дальнейшем увеличении внешнего момента на валу машины ЭДС E_a станет больше напряжения, а в цепи якоря опять возникает ток, но другого направления. При этом машина перейдет в *генераторный* режим: механическая энергия, затрачиваемая на вращение якоря, будет преобразовываться в электрическую и поступать в сеть.

Перевод машины из двигательного в генераторный режим используют для торможения двигателя, так как в генераторном режиме электромагнитный момент является тормозящим (рекуперативное торможение).

6.6. Двигатель последовательного возбуждения

В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря (рис. 6.9, *а*), поэтому магнитный поток Φ в нем зависит от тока нагрузки $I = I_a = I_B$. При небольших нагрузках магнитная система машины не насыщена и зависимость магнитного потока от тока нагрузки прямо пропорциональна, т. е. $\Phi = k_\Phi I_a$. В этом случае найдем по (6.24) электромагнитный момент:

$$M = c_M k_\Phi I_a I_a = c'_M I_a^2$$

Формула частоты вращения (29.5) примет вид

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e k_\Phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{c'_e I_a}. \qquad (6.15)$$

Здесь k_Φ — коэффициент пропорциональности.

На рис. 6.9, *б* представлены рабочие характеристики $M = f(I)$ и $n = (I)$ двигателя последовательного возбуждения. При больших нагрузках наступает насыщение магнитной системы двигателя. В этом случае магнитный поток при возрастании нагрузки практически не изменяется и характеристики двигателя приобретают почти прямолинейный характер. Характеристика частоты вращения двигателя последовательного возбуждения показывает, что

частота вращения двигателя значительно меняется при изменениях нагрузки. Такую характеристику принято называть *мягкой.*

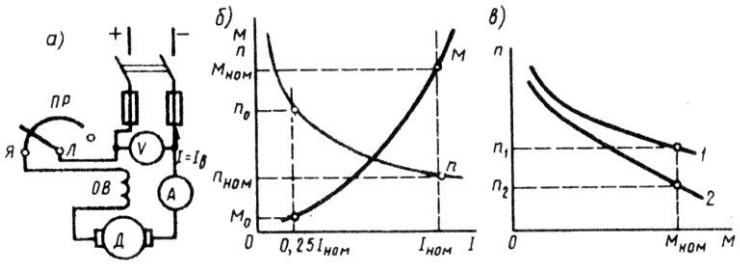


Рис. 6.9. Двигатель последовательного возбуждения:
а — принципиальная схема; *б* — рабочие характеристики; в — механические характеристики; *1* — естественная характеристика; *2* — искусственная характеристика

При уменьшении нагрузки двигателя последовательного возбуждения частота вращения резко увеличивается и при нагрузке меньше 25% от номинальной может достигнуть опасных для двигателя значений («разнос»). Поэтому работа двигателя последовательного возбуждения или его пуск при нагрузке на валу меньше 25% от номинальной недопустима.

Для более надежной работы вал двигателя последовательного возбуждения должен быть жестко соединен с рабочим механизмом посредством муфты и зубчатой передачи. Применение ременной передачи недопустимо, так как при обрыве или сбросе ремня может произойти «разнос» двигателя. Учитывая возможность работы двигателя на повышенных частотах вращения, двигатели последовательного возбуждения, согласно ГОСТу, подвергают испытанию в течение 2 мин на превышение частоты вращения на 20% сверх максимальной, указанной на заводском щите, но не меньше чем на 50% сверх номинальной.

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения $n = f(M)$ представлены на рис. 6.9, *в.* Резко падающие кривые механических характеристик (естественная *1* и искусственная *2*) обеспечивают двигателю последовательного возбуждения устойчивую работу при любой механической нагрузке. Свойство этих двигателей развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, имеет важное значение, особенно в тяжелых условиях пуска и при перегрузках, так как с постепенным увеличением нагрузки двигателя мощность на его входе растет медленнее, чем вращающий момент. Эта особенность двигателей последовательного возбуждения является одной из причин их широкого применения в качестве тяговых двигателей на транспорте, а также в качестве крановых двигателей в подъемных установках, т. е. во всех случаях электропривода с тяжелыми условиями пуска и сочетания значительных нагрузок на вал двигателя с малой частотой вращения.

Номинальное изменение частоты вращения двигателя последовательного возбуждения

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_{[0,25]} - n_{ном}}{n_{ном}} 100\%, \qquad (6.16)$$

где $n_{[0,25]}$ — частота вращения при нагрузке двигателя, составляющей 25% от номинальной.

Частоту вращения двигателей последовательного возбуждения можно регулировать изменением либо напряжения U, либо магнитного потока обмотки возбуждения. В первом случае в цепь якоря последовательно включают регулировочный реостат $R_{рг}$ (рис. 6.10, *а*). С увеличением сопротивления этого реостата уменьшаются напряжение на входе двигателя и частота его вращения. Этот метод регулирования применяют главным образом в двигателях небольшой мощности. В случае значительной мощности двигателя этот способ неэкономичен из-за больших потерь энергии в $R_{рг}$. Кроме того, реостат $R_{рг}$, рассчитываемый на рабочий ток двигателя, получается громоздким и дорогостоящим.

При совместной работе нескольких однотипных двигателей частоту вращения регулируют изменением схемы их включения относительно друг друга (рис. 6.10, *б*). Так, при параллельном включении двигателей каждый из них оказывается под полным напряжением сети, а при

последовательном включении двух двигателей на каждый двигатель приходится половина напряжения сети. При одновременной работе большего числа двигателей возможно большее количество вариантов включения. Этот способ регулирования частоты вращения применяют в электровозах, где установлено несколько одинаковых тяговых двигателей.

Изменение подводимого к двигателю напряжения возможно при питании двигателя от источника постоянного тока с регулируемым напряжением (например, по схеме, аналогичной рис. 6.6, *а*). При уменьшении подводимого к двигателю напряжения его механические характеристики смещаются вниз, практически не меняя своей кривизны (рис. 6.11).

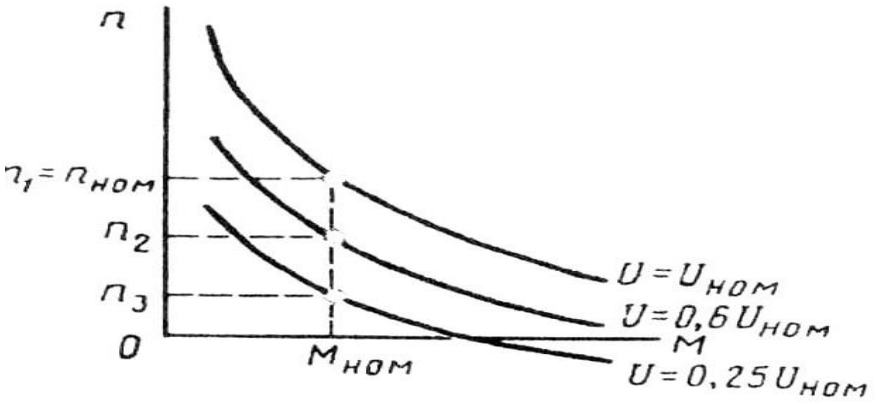


Рис. 6.11. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при изменении подводимого напряжения

Регулировать частоту вращения двигателя изменением магнитного потока можно тремя способами: шунтированием обмотки возбуждения реостатом $r_{рг}$, секционированием обмотки возбуждения и шунтированием обмотки якоря реостатом $r_ш$. Включение реостата $r_{рг}$, шунтирующего обмотку возбуждения (рис. 6.10, *в*), а также уменьшение сопротивления этого реостата ведет к снижению тока возбуждения $I_В = I_а - I_{рг}$, а следовательно, к росту частоты вращения. Этот способ экономичнее предыдущего (см. рис. 6.10, *а*), применяется чаще и оценивается коэффициентом регулирования $k_{рг} = (I_{рг} / I_а) \cdot 100\%$. Обычно сопротивление реостата $r_{рг}$ принимается таким, чтобы $k_{рг} \geq 50\%$.

При секционировании обмотки возбуждения (рис. 6.10, *г*) отключение части витков обмотки сопровождается ростом частоты вращения. При шунтировании обмотки якоря реостатом $r_ш$ (см. рис. 6.10, *в*) увеличивается ток возбуждения $I_В = I_а + I_ш$, что вызывает уменьшение частоты вращения. Этот способ регулирования, хотя и обеспечивает глубокую регулировку, неэкономичен и применяется очень редко.

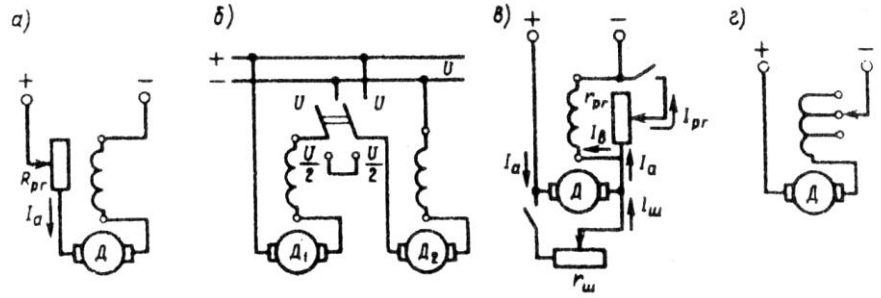


Рис. 6.10. Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения

6.7. Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (рис. 6.12, *а*). Частота вращения этого двигателя

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e(\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \qquad (6.17)$$

где Φ_1 и Φ_2 — потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

Знак плюс соответствует *согласованному* включению обмоток возбуждения (МДС обмоток складываются). В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток возрастает (за счет потока последовательной обмотки Φ_2), что ведет к уменьшению частоты вращения двигателя. При *встречном* включении обмоток поток Φ_2 при увеличении нагрузки размагничивает машину (знак минус), что, наоборот, повышает частоту вращения. Работа двигателя при этом становится неустойчивой, так как с увеличением нагрузки частота вращения неограниченно растет. Однако при небольшом числе витков последовательной обмотки с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает и во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменной.

На рис.6.12, *б* показаны рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток возбуждения, а на рис. 6.12, *в* — механические характеристики. В отличие от механических характеристик двигателя последовательного возбуждения последние имеют более пологий вид.

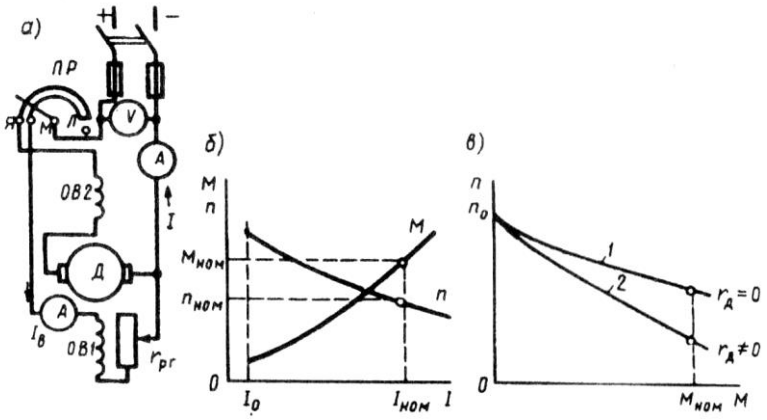


Рис. 6.12. Схема двигателя смешанного возбуждения *(а),* его рабочие *(б)* и механические (в) характеристики

Следует отметить, что по своей форме характеристики двигателя смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения в зависимости от того, в какой из обмоток возбуждения (параллельной или последовательной) преобладает МДС.

Двигатель смешанного возбуждения имеет преимущества по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Этот двигатель может работать вхолостую, так как поток параллельной обмотки Φ_1 ограничивает частоту вращения двигателя в режиме х.х. и устраняет опасность «разноса». Регулировать частоту вращения этого двигателя можно реостатом в цепи параллельной обмотки возбуждения. Однако наличие двух обмоток возбуждения делает двигатель смешанного возбуждения более дорогостоящим по сравнению с двигателями рассмотренных выше типов, что несколько ограничивает его применение. Двигатели смешанного возбуждения применяют обычно там, где требуются значительные пусковые моменты, быстрое ускорение при разгоне, устойчивая работа и допустимо лишь небольшое снижение частоты вращения при увеличении нагрузки на вал (прокатные станы, грузовые подъемники, насосы, компрессоры).

6.8. Потери и коэффициент полезного действия коллекторной машины постоянного тока

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

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

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

$$P_{Э.В} = U_B I_B. \qquad (6.18)$$

Здесь U_B — напряжение на зажимах цепи возбуждения. Потери в обмотках цепи якоря

$$P_{Э.а} = I_a^2 \sum r \qquad (6.19)$$

где сопротивление обмоток в цепи якоря $\sum r$, приведенное к расчетной рабочей температуре $\theta_{раб}$, определяется по (13.4) с учетом данных, приведенных в § 13.1 и § 8.4.

Электрические потери также имеют место и в контакте щеток:

$$P_{Э.Щ} = \Delta U_{Щ} I_a, \qquad (6.20)$$

где $\Delta U_{Щ}$ — переходное падение напряжения, В, на щетках обеих полярностей, принимаемое в соответствии с маркой щеток по табл. 27.1.

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

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

$$P_k = k_{тр} S_{Щ} f_{Щ} V_k, \qquad (6.21)$$

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

$$P = P_к + P_П + P_{вен}, \qquad (6.22)$$

где $k_{тр}$ — коэффициент трения щеток о коллектор $(k_{тр} = 0{,}2 \div 0{,}3)$; $S_{Щ}$ — поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором, м^2; $f_{Щ}$ — удельное давление, Н/м^2, щетки [для машин общего назначения $f_{Щ}$ =(2÷3)·10^4 Н/м^2];

окружная скорость коллектора (м/с) диаметром D_k (м)

$$V_k = \pi D_k n/60. \qquad (6.23)$$

Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения $(n = const)$ можно считать *постоянными*.

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

$$P_0 = P_м + P_{мех}. \qquad (6.24)$$

Если машина работает в качестве двигателя параллельного возбуждения в режиме х.х., то она потребляет из сети мощность

$$P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_м + P_{мех} + I_{a0}^2 \sum r + \Delta U_{Щ} I_{a0} + U_B I_B. \qquad (6.25)$$

Однако ввиду небольшого значения тока I_{a0} электрические потери $I_{a0}^2 \sum r$ и $\Delta U_{Щ} I_{a0}$ весьма малы и обычно не превышают 3% потерь $P_0 = P_м + P_{мех}$. Поэтому, не допуская заметной

ошибки, можно записать $P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_0 + U_B I_B$, откуда потери х.х.

$$P_0 = P_{10} - U_B I_B . \qquad (6.26)$$

Таким образом, потери х.х. (магнитные и механические) могут быть определены экспериментально.

В машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь — *добавочных.* Эти потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнительных соединениях, в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией основного потока из-за наличия зубцов якоря, и др. Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету величину. Поэтому, согласно ГОСТу, в машинах без компенсационной обмотки значение добавочных потерь $P_Д$ принимают равным 1% от полезной мощности для генераторов или 1% от подводимой мощности для двигателей. В машинах с компенсационной обмоткой значение добавочных потерь принимают равным соответственно 0,5%.

Мощность (Вт) *на входе машины* постоянного тока (подводимая мощность):

для генератора (механическая мощность)

$$P_{1ген} = M_1 \omega = 0{,}105 M_1 n, \qquad (6.27)$$

где M_1 — вращающий момент приводного двигателя, Н·м;

для двигателя (электрическая мощность)

$$P_{1ДВ} = UI . \qquad (6.28)$$

Мощность (Вт) *на выходе машины* (полезная мощность):

для генератора (электрическая мощность)

$$P_{2ген} = UI ; \qquad (6.29)$$

для двигателя (механическая мощность)

$$P_{2ДВ} = 0{,}105 M_2 n . \qquad (6.30)$$

Здесь M_1 и M_2 — момент на валу электрической машины, Н-м; n — частота вращения, об/мин.

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

$$\eta = P_2 / P_1 .$$

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь

$$\sum P = P_М + P_{МЕХ} + P_{Э.В} + P_{Эа} + P_{ЭЩ} + P_Д , \qquad (6.31)$$

можно подсчитать КПД машины по одной из следующих формул:

для генератора

$$\eta_Г = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P} ; \qquad (6.32)$$

для двигателя

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI} . \qquad (6.33)$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75—0,90 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,90—0,97 для машин мощностью свыше 100 кВт. Намного меньше КПД машин постоянного тока малой мощности. Например, для машин мощностью от 5 до 50 Вт η = 0,15÷0,50. Указанные значения КПД соответствуют номинальной нагрузке машины. Зависимость КПД машины постоянного тока от нагрузки выражается графиком $\eta = f(P_2)$, форма которого характерна для электрических машин (рис. 6.13).

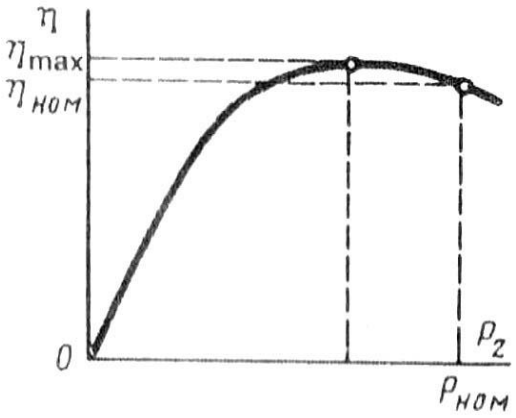


Рис. 6.13. Зависимость $\eta = f(P_2)$

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

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

Существует несколько косвенных способов определения КПД. Наиболее прост способ холостого хода двигателя, когда потребляемая машиной постоянного тока мощность затрачивается только на потери х.х. [см. (6.26)]. Что же касается электрических потерь, то их определяют расчетным путем после предварительного измерения электрических сопротивлений обмоток и приведения их к рабочей температуре.

Пример 6.1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения (см. рис. 6.3) включен в сеть с напряжением 220 В. При номинальной нагрузке и частоте вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин он потребляет ток $I_{ном}$ = 43 А. Определить КПД двигателя при номинальной нагрузке, если ток х.х. I_0 = 4 А, а сопротивления цепей якоря $\sum r$ = 0,25 Ом и возбуждения r_B = 150 Ом. При каком добавочном сопротивлении $r_{ДОБ}$, включенном последовательно в цепь якоря, частота вращения двигателя будет n = 1000 об/мин (нагрузочный момент $M_2 = const$)?

Решение. Ток возбуждения $I_B = U / r_B$ = 220/150 =1,47 А. Ток якоря в режиме х.х. $I_{a0} = I_0 - I_B$ = 4 - 1,47 = 2,53 А. Ток якоря номинальный $I_{аном} = I_{ном} - I_B$ = 43 - 1,47 = 41,53 А. Сумма магнитных и механических потерь $P_0 = P_M + P_{MEX} = UI_{a0} - I_{a0}^2 \sum r$ = 220- 2,53 -2,53^2- 0,25 = 555 Вт. Электрические потери в цепи возбуждения по (29.18)

$$P_{Э.В} = UI_B = 220 \cdot 1{,}47 = 323{,}4 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в цепи якоря по (29.19)

$$P_{эа} = I_{аном}^2 \sum r = 41{,}53^2 \cdot 0{,}25 = 431 \text{Вт.}$$

Электрические потери в щеточном контакте по (29.20)

$$P_{э.щ} = \Delta U_{щ} I_{аном} = 2 \cdot 41б53 = 83 \text{ Вт.}$$

Подводимая к двигателю мощность по (29.28)

$$P_{1ном} = UI_{ном} = 220 \cdot 43 = 9460 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери

$$P_{ДОБ} = 0{,}01 P_{1ном} = 0{,}01 \cdot 9460 = 94{,}6 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери по (29.31)

$$\sum P = 555 + 323{,}4 + 431 + 83 + 94{,}6 = 1487 \text{ Вт.}$$

Полезная мощность двигателя

$$P_{ном} = P_{1ном} - \sum P = 9460 - 1487 = 7973\,\text{Вт}.$$

КПД двигателя при номинальной нагрузке

$$\eta_{ном} = P_{ном} / P_{1ном} = 7973/9460 = 0{,}843.$$

Из выражения (29.5) получим

$$c_e \Phi = \frac{U - I_a \sum r}{n_{ном}} = \frac{220 - 41{,}53 \cdot 0{,}25}{1500} = 0{,}14$$

ЭДС якоря при частоте вращения 1000 об/мин по (25.20)

$$E_a = c_e \Phi n = 0{,}14 \cdot 1000 = 140\,\text{В}.$$

Так как ток якоря прямо пропорционален моменту $I_a \equiv M$ [см (6.24)], то при $M = const$ сила тока I_a после включения $r_{ДОБ}$ останется прежней $I_a = I_{0ном} = 41{,}53$ А. Из выражения тока якоря (29.2) получим

$$r_{ДОБ} = \frac{U - E_a}{I_a} - \sum r = \frac{220 - 140}{41{,}53} - 0{,}25 = 1{,}68\,\text{Ом}.$$

Электрические потери в добавочном сопротивлении

$$P_{0ДОБ} = I_a^2 r_{ДОБ} = 41{,}53^2 \cdot 1{,}68 = 2897\,\text{Вт}.$$

Полезная мощность двигателя при частоте вращения 1000 об/мин

$$P_2 \approx P_{ном} - P_{0ДОБ} = 7973 - 2897 = 5076\,\text{Вт}.$$

Расчет полезной мощности P_2 является приближенным, так как он не учитывает уменьшение механических потерь двигателя при его переходе на меньшую частоту вращения.

6.9. Машины постоянного тока серий 4П и 2П

Стремительное развитие автоматизации производства привело к необходимости создания двигателей постоянного тока с широким диапазоном регулирования частоты вращения (до 1:1000) с хорошими динамическими свойствами. Этим требованиям соответствуют двигатели серии 4П. Серия охватывает двигатели с высотой оси вращения от 80 до 450 мм следующих модификаций.

Двигатели типа 4ПО и 4ПБ охватывают диапазон мощности от 0,126 до 5,5 кВт при номинальной частоте вращения от 750 до 3000 об/мин. Двигатели допускают регулирование частоты вращения вниз от номинальной уменьшением напряжения на обмотке якоря при снижении тока до 0,5 $I_{ном}$. А так же вверх от номинальной (уменьшением тока возбуждения) в пределах максимальной частоты вращения, которая превышает номинальную в среднем в 1,35— 1,8 раза.

Конструкция этих двигателей унифицирована с асинхронными двигателями серии *4А.* Это позволило применить для производства некоторых узлов двигателей типа *4ПО* и *4ПБ* технологическое оборудование, применяемое в производстве двигателей серии *4А.* В унифицированной конструкции этих двигателей магнитопровод статора неявнополюсный с распределенными в пазах обмотками. Так, обмотка возбуждения (независимая) укладывается в два паза в пределах каждого полюсного деления, остальные пазы занимает компенсационная обмотка. В двигателях типа *4ПО* и *4ПБ* и двигателях серии *4А* одинакового габарита могут быть применены одинаковые станины, задние подшипниковые шиты, коробки выводов, подшипники и т. п.

Применение распределенных обмоток на статоре двигателей типа *4ПО* и *4ПБ* улучшило процесс охлаждения и позволило увеличить токовые нагрузки на обмотки возбуждения и компенсационную. Кроме того, распределенная конструкция обмоток статора способствует лучшей компенсации реакции якоря и улучшению коммутации.

Двигатели постоянного тока типов *4ПО* и *4ПБ* имеют закрытое исполнение со степенью защиты *IP44* со способами охлаждения *IC0141* (наружный обдув) в двигателях типа *4ПО* (рис. 29.14) и *IC0041* (естественное охлаждение) в двигателях типа *4ПБ.*

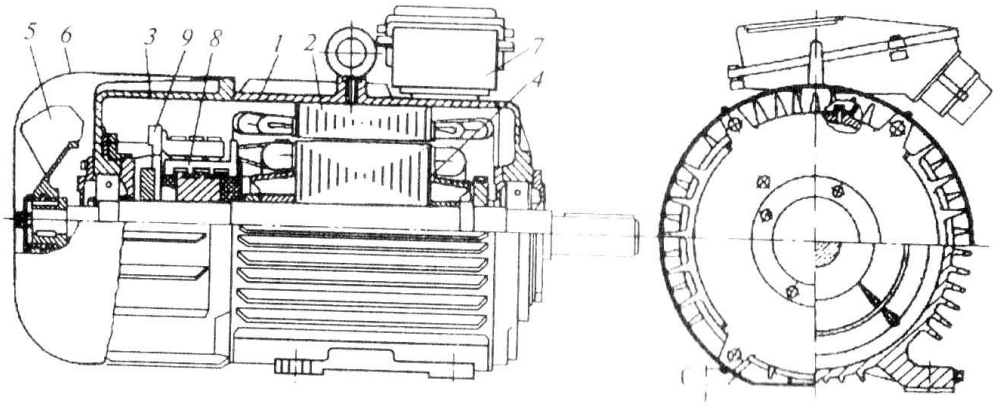


Рис. 6.14. Двигатель постоянного тока типа 4IIO унифицированной конструкции;
/ — корпус; 2 — магнитопровод статора с распределенными обмотками; *3* — шит подшипниковый передний; *4* — сердечник якоря; *5* — вентилятор, *6* — кожух вентилятора; *7* — коробка выводов; *8* — коллектор, *9* — траверса.

Широкорегулируемые двигатели типа 4ПФ предназначены для привода станков с программным управлением, роботизированных производственных комплексов. Исполнение двигателей по степени защиты IP23 (защищенные), способ охлаждения IC06 (независимая вентиляция). Двигатели охватывают номинальные мощности от 2,0 до 250 кВт при высоте оси вращения от 112 до 250 мм. Напряжение питания 220 и 440 В. Регулирование частоты вращения возможно изменением подводимого к обмотке якоря напряжения от 0 до 460 В. Допускается также регулирование частоты вращения ослаблением поля возбуждения (уменьшением тока в обмотке возбуждения).

Статор двигателей восьмигранный шихтованный, явнополюсный (рис. 6.15). Пакет статора запрессован между двумя нажимными плитами толщиной 10 мм. Подшипниковые шиты литые чугунные.

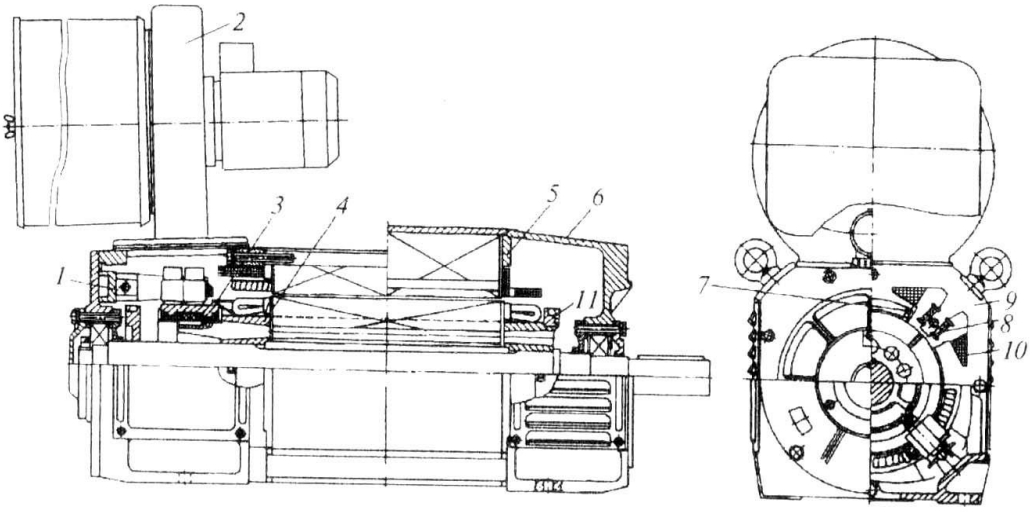


Рис.6.15. Двигатель постоянного тока типа 4ПФ:
1 — траверса; 2 — вентилятор наружный; *3* — коллектор; *4* — обмоткодержатель якоря; 5 — нажимная плита статора; 6 — подшипниковый щит; 7 — обмотка компенсационная; *8* — дополнительный полюс; 9 — статор; *10* — обмотка независимого возбуждения *11* — балансировочное кольцо

Катушки возбуждения намотаны на главные полюса, катушки дополнительной обмотки надеты на добавочные полюса, компенсационная обмотка расположена в пазах полюсных наконечников.

Наружный вентилятор может быть снабжен фильтром для очистки воздуха от пыли и мелких частиц. Вентилятор расположен на боковой или торцевой поверхности со стороны коллектора.

Крупные двигатели 4П для тяжелых условий эксплуатации предназначены для привода крупных металлорежущих станков, механизмов металлургического производства, с частыми пусками, остановками, реверсами, набросами и неравномерностью нагрузки. Двигатели изготавливаются с высотой оси вращения 355 и 450 мм мощностью от 110 до 800 кВт; напряжение питания 440 и 600 В. Возбуждение независимое напряжением 220 В. Вентиляция от постороннего вентилятора. Двигатели имеют степень защиты IP44 и IP23.

6.10. Универсальные коллекторные двигатели

Универсальными называют коллекторные двигатели, которые могут работать как от сети постоянного, так и от сети однофазного переменного тока.

Коллекторный двигатель постоянного тока в принципе может работать от сети переменного тока, так как при переходе от положительного полупериода переменного напряжения к отрицательному направление электромагнитного момента сохраняется неизменным. Объясняется это тем, что при переходе к отрицательному полупериоду почти одновременно с изменением направления тока в обмотке якоря меняется направление тока в обмотке возбуждения, т. е. меняется полярность полюсов.

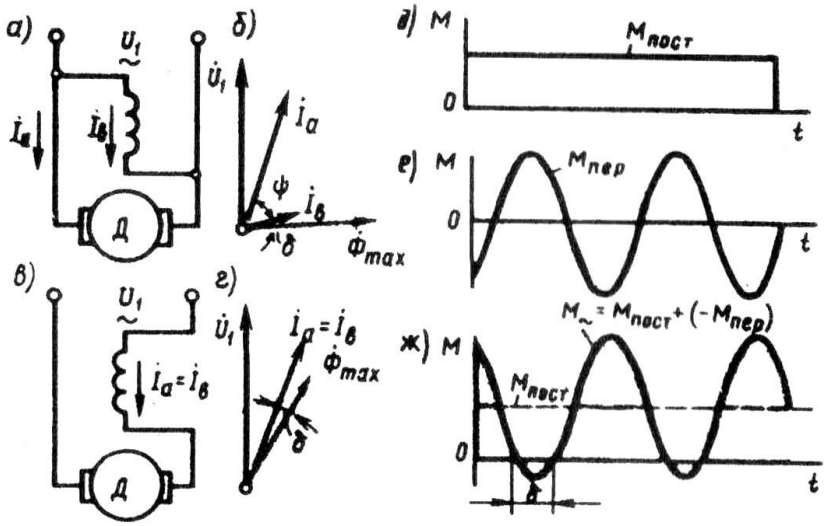


Рис. 6.16. К принципу работы универсального коллекторного двигателя

Однофазные коллекторные двигатели имеют преимущественно последовательное возбуждение. Применение параллельного возбуждения (рис. 6.14, *а*) в данном случае ограничивается значительной индуктивностью параллельной обмотки возбуждения, имеющей большое число витков. Это создает значительный фазовый сдвиг между током якоря $\dot{I}_a$ и током возбуждения I_B на угол ψ (рис. 6.14, *б*). Среднее значение электромагнитного момента в этом случае определяется выражением, аналогичным выражению (25.24), но учитывающим угол сдвига между током якоря и магнитным потоком:

$$M_{пар} = c_M (\Phi_{max} / \sqrt{2}) I_a \cos(\psi + \delta), \qquad (6.34)$$

где Φ_{max} — максимальное значение магнитного потока; ψ — угол сдвига фаз между током якоря и током возбуждения; δ — угол сдвига фаз между током возбуждения и магнитным потоком, обусловленный наличием магнитных потерь в машине [$(\psi + \delta) \approx 90^0$, а следовательно, $\cos(\psi + \delta) \approx 0$].

В двигателе последовательного возбуждения (рис. 6.14, в) ток якоря $\dot{I}_a$ и ток возбуждения I_B совпадают по фазе: ψ = 0 (рис. 6.14, *г*). Поэтому среднее значение электромагнитного вращающего момента в двигателе последовательного возбуждения $M_{посл}$ больше, чем в двигателе параллельного возбуждения:

$$M_{посл} = c_M(\Phi_{max}/\sqrt{2})I_a \cos\delta . \qquad (6.35)$$

Электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения при работе от сети переменного тока имеет постоянную составляющую $M_{пост}$ (рис. 29.14, *д*) и переменную составляющую $M_{пер}$, изменяющуюся с частотой, равной удвоенной частоте сети f_1 (рис. 6.14, *е*). Результирующий момент этого двигателя является пульсирующим $M_{\sim} = M_{посл}$ (рис. 6.14, *ж*): $M_{\sim} = M_{пост} + (-M_{пер})$. Небольшие участки графика $M = f(t)$ с отрицательным (тормозящим) моментом обусловлены фазовым сдвигом между векторами магнитного потока $\dot{\Phi}_{max}$ и током $\dot{I}_1$ (рис. 6.14, *г*). Пульсации момента $M_{\sim}$ практически не нарушают работу двигателя, включенного в сеть переменного тока, так как сглаживаются за счет момента инерции вращающегося якоря.

По своей конструкции универсальные коллекторные двигатели отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюсы делаются шихтованными из листовой электротехнической стали. Это дает возможность сократить магнитные потери, которые при работе двигателя от сети переменного тока повышаются, так как переменный ток в обмотке возбуждения вызывает перемагничивание всей магнитной цепи, включая станину и сердечники полюсов.

Основной недостаток однофазных коллекторных двигателей — тяжелые условия коммутации. Дело в том, что в коммутирующих секциях помимо реактивной ЭДС и ЭДС внешнего поля наводится трансформаторная ЭДС $e_{тр}$, действующее значение которой

$$E_{тр} = 4{,}4 f_1 w_c \Phi_{max} . \qquad (6.36)$$

Эта ЭДС наводится переменным магнитным потоком возбуждения, сцепленным с коммутирующими секциями. Для уменьшения трансформаторной ЭДС необходимо уменьшить поток Φ_{max}, а чтобы мощность двигателя при этом осталась прежней, следует увеличить число полюсов в двигателе.

Применение в обмотке якоря двигателя одновитковых секций $(w_c = 1)$ также способствует ограничению $E_{тр}$, но при этом увеличивается количество пластин в коллекторе, а следовательно, возрастают его размеры. Применение добавочных полюсов с обмоткой, включенной последовательно в цепь якоря, позволяет добиться полной взаимной компенсации трансформаторной ЭДС только при определенных значениях тока якоря и частоты вращения. При других режимах работы двигателя условия коммутации остаются тяжелыми. Регулировка частоты вращения и реверсирование однофазного коллекторного двигателя выполняются так же, как и в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения.

В *универсальном коллекторном двигателе* стремятся получить примерно одинаковые частоты вращения при номинальной нагрузке, как на постоянном, так и на переменном токе. Достигается это тем, что обмотку возбуждения двигателя выполняют с ответвлениями: при работе двигателя от сети постоянного тока обмотка возбуждения используется полностью, а при работе от сети переменного тока — частично (рис. 6.15, *а*).

Расхождения в характеристиках двигателя на постоянном и переменном токе объясняются тем, что при работе от сети переменного тока на величину и фазу тока оказывают влияние индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения.

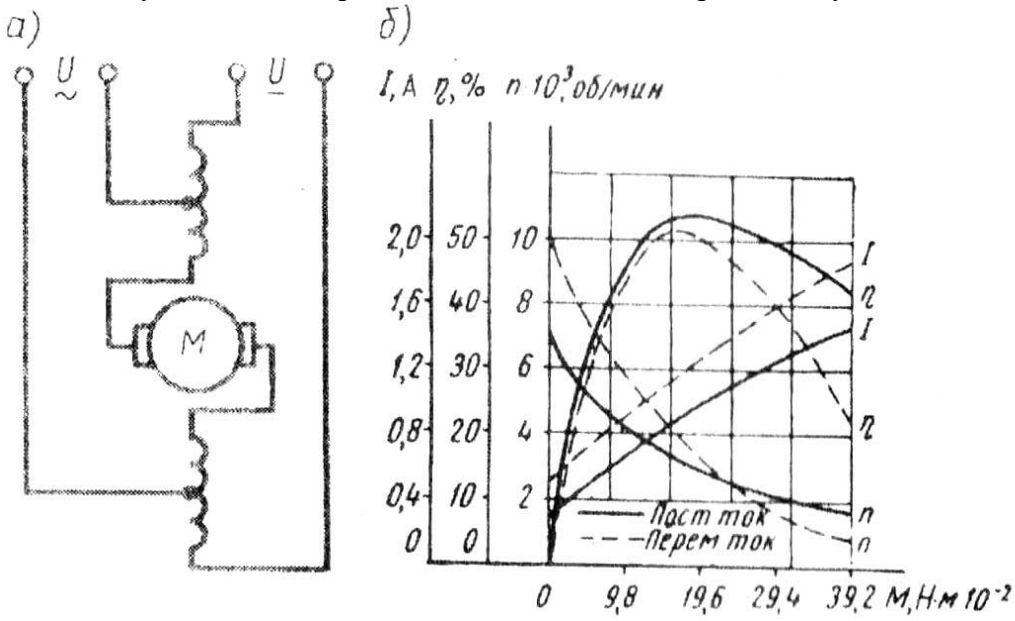


Рис. 6.17. Схема соединений и рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя

Однако уменьшение числа витков обмотки возбуждения обеспечивает сближение характеристик лишь при нагрузке, близкой к номинальной. На рис. 6.15, *б* приведены рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя типа УМТ-22 (55 Вт, 200 об/мин, 110/127 В). Потребляемый двигателем ток при работе от сети переменного тока больше, чем при работе этого же электродвигателя от сети постоянного тока, так как переменный ток помимо активной имеет еще и реактивную составляющую. Коэффициент полезного действия универсальных двигателей при переменном токе ниже, чем при постоянном, что вызвано повышенными магнитными потерями. Области применения универсальных коллекторных двигателей достаточно широки: их применяют в автоматике, для привода различного электроинструмента, бытовых электроприборов и др.

Контрольные вопросы

1. Какие способы ограничения пускового тока применяются в двигателях постоянного тока?
2. С какой целью при пуске двигателя параллельного возбуждения сопротивление реостата в цепи возбуждения устанавливают минимальным?
3. Сравните двигатели параллельного и последовательного возбуждения по их регулировочным свойствам.
4. Какова разница в конструкции коллекторных двигателей постоянного и переменного тока?

Список используемой литературы

1. Алиев, И. Электрические машины: Учебное пособие для студ. Вузов / И. Алиев. - М.: РадиоСофт, 2011. - 448 с.

2. Алиев, И.И. Электрические машины / И.И. Алиев. - М.: Радио и связь, 2012. - 448 с.

3. Алиев, И.И. Электрические машины /И.И. Алиев.- Вологда: Инфра-Инженерия,2014. - 448 с.

4. Антонов, Ю.Ф. Сверхпроводниковые топологические электрические машины / Ю.Ф. Антонов, Я.Б. Данилевич. - М.: Физматлит, 2009. - 368 с.

5. Баклин, В.С. Электрические машины. расчет двухполюсных турбогенераторов. практикум.: Учебное пособие для прикладного бакалавриата / В.С.Баклин. - Люберцы: Юрайт, 2016.-137 с.

6. Беспалов, В.Я. Электрические машины: Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец.. - М.: ИЦ Академия, 2013. - 320 с.

7. Битюцкий, И.Б. Электрические машины. Двигатель постоянного тока. Курсовое проектирование: Учебное пособие / И.Б. Битюцкий, И.В. Музылева. - СПб.: Лань, 2018.- 184 с.

8. Брускин, А.Э. Электрические машины и микромашины: Учебник / А.Э. Брускин, А.Е. Зохорович, В.С. Хвостов. - М.: Альянс, 2016. - 528 с.

9. Брускин, Д.Э. Электрические машины Ч.2. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвост. - М.: Альянс, 2016. - 304 с.

10. Брускин, Д.Э. Электрические машины Ч.1. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвост. - М.: Альянс, 2016. - 319 с.

11. Ванурин, В.Н. Электрические машины: Учебник / В.Н. Ванурин. - СПб.: Лань,2016. - 352 с.

12. Ванурин, В.Н. Электрические машины: Учебник /В.Н. Ванурин. - СПб.: Лань, 2016. - 304 с.

13. Вольдек, А. Электрические машины Введение в электромеханику Машины постоянного тока и трансформаторы / А. Вольдек. - СПб.: Питер, 2009. - 320 с.

14. Вольдек, А. Электрические машины Машины переменного тока / А. Вольдек. - СПб.: Питер, 2010. - 350 с.

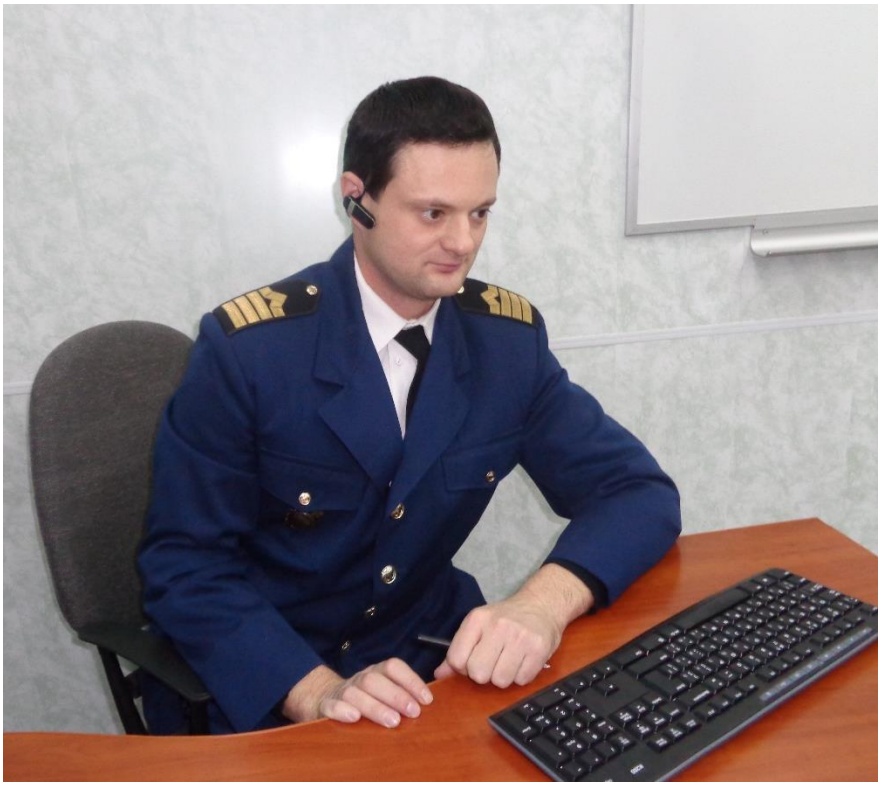
15. Встовский, А.Л. Электрические машины: Учебное пособие / А.Л. Встовский. - М.: Инфра-М, 2007. - 512 с.

16. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона-Век, 2010. - 256 с.

17. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона Принт, 2007. - 256 с.

18. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-. - СПб.: Корона-Принт, 2013. - 256 с.

19. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины.Лабораторн.работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона Принт, 2013. - 256 с.
20. Глазков, А.В. Электрические машины. Лабораторные работы: Учебное пособие / А.В. Глазков. - М.: Риор, 2018. - 478 с.
21. Епифанов, А.П. Электрические машины: Учебник / А.П. Епифанов, Г.А. Епифанов. - СПб.: Лань, 2017. - 300 с.
22. Епифанов, А.П. Электрические машины: Учебник / А.П. Епифанов. - СПб.: Лань, 2006. - 272 с.
23. Ермолин, Н.П. Электрические машины малой мощности / Н.П. Ермолин. - М.: КноРус, 2014. - 192 с.
24. Игнатович, В.М. Электрические машины и трансформаторы: Учебное пособие для академического бакалавриата / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 181 с.
25. Кацман, М.М. Электрические машины:Учебник /М.М. Кацман.- М.: Academia, 2017.- 320 с.
26. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. - М.: Высшая школа, 2003. - 469 с.
27. Кацман, М.М. Электрические машины: Учебник для студ. учреждений среднего проф. образования / М.М. Кацман. - М.: ИЦ Академия, 2013. - 496 с.
28. Кацман, М.М. Электрические машины: Учебник / М.М. Кацман. - М.:Academia, 2016.- 48 с.
29. Кацман, М.М. Электрические машины: Учебник М.М. Кацман. - М.: Academia, 2018.- 96 с.
30. Кацман, М.М. Электрические машины. справочник (спо) / М.М. Кацман. - М.: КноРус, 2019. - 288 с.
31. Копылов, И.П. Электрические машины в 2 т. том 1: Учебник для академического бакалавриата / И.П. Копылов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 267 с.
32. Копылов, И.П. Электрические машины в 2 т. том 2: Учебник для академического бакалавриата / И.П. Копылов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 407 с.
33. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Высшая школа, 2006. - 607 с.
34. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Высшая школа, 2009. - 607 с.
35. Копылов, И.П. Электрические машины: Учебник. В 2 т / И.П. Копылов. - Люберцы: Юрайт, 2015. - 674 с.
36. Копылов, И.П. Электрические машины. / И.П. Копылов. - М.: Высшая школа, 2006. - 607 с.
37. Лобзин, С.А. Электрические машины / С.А. Лобзин. - М.: Academia, 2016. - 32 с.
38. Лобзин, С.А. Электрические машины: Учебник / С.А. Лобзин. - М.: Academia, 2017. - 16 с.



Матросов Алексей Валерьевич - работает преподавателем в Государственном автономном профессиональном образовательном учреждении "Городецкий Губернский колледж", имеет первую квалификационную категорию, является экспертом по стандартам Worldskills в рамках своего региона. С 2019 года является заведующим отделением технических специальностей и профессий. Алексей Валерьевич - один из ведущих преподавателей специальности 26.02.06. Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики в колледже. Для подготовки конкурентоспособных выпускников педагог много внимания уделяет новым технологиям, разработкам в области эксплуатации судового электрооборудования, пополнению и обновлению материально-технической базы лаборатории электрооборудования судов, судовых электроэнергетических систем, судовых электроприводов.