Глава 15

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 15.1. Назначение и области применения машин постоянного тока

Электрические машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей и генераторов, несмотря на преобладающее распространение электроэнергии переменного тока.

Двигатели постоянного тока обладают важными преимуществами перед другими электродвигателями: они позволяют плавно и глубоко регулировать скорость ротора и создают большой пусковой момент, что определяет их широкое использование в качестве тяговых двигателей.

В системах автоматического регулирования специальные генераторы постоянного тока служат в качестве усилителей электрических сигналов управления, тахогенераторов. Широкое применение находят генераторы постоянного тока для питания электролитических ванн, зарядки аккумуляторов, высококачественной сварки. Машины постоянного тока входят в число элементов автомобильного, судового и самолетного электрооборудования.

Машины постоянного тока выпускаются на различные мощности и напряжения: гигантские машины (6000 кВт) — для прокатных станов и микромашины (доли ватта) — для схем автоматики. Машины высокого напряжения (до 30 кВ) и мощностью 3—150 кВт используют в радиотехнике. Низкое напряжение (20—60 В) имеют сварочные генераторы, генераторы для электролиза, электрические машины на автотранспорте (6—12 В). Мощность двигателей трамвайных вагонов составляет 40—45 кВт, напряжение 550 В. Двигатели электропоездов пригородных железных дорог имеют мощность 150—200 кВт и напряжение 1500 В, а двигатели электровозов 450—500 кВт и 3 кВ.

§ 15.2. Устройство машины постоянного тока

Машина постоянного тока, как и всякая электрическая машина, состоит из двух основных частей: неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора (рис. 15.1). В основе работы машины постоянного тока лежат явления наведения э. д. с. в проводниках, движущихся в магнитном поле, и явление возникновения электромагнитных сил, действующих на проводники с током в магнитном поле. Статор *6* (меха-

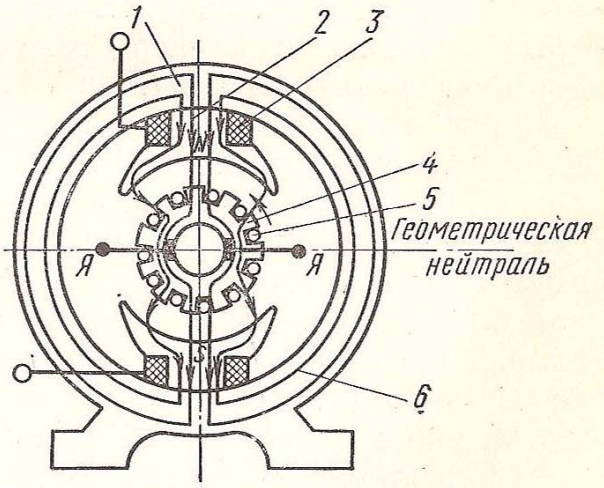

Рис. 15.1. Устройство машины постоянного тока

нический остов машины) предназначен для создания магнитного поля. Ротор с обмоткой *5* в машине постоянного тока называют *якорем 4*.

В машине постоянного тока магнитное поле неподвижно и возбуждается либо постоянными магнитами, либо электромагнитами постоянного тока (рис. 15.1). Электромагниты крепят к статору машины и называют *основными полюсами возбуждения*. Катушки электромагнитов соединяют последовательно так, чтобы полюсы N — S чередовались. Эти катушки образуют обмотку возбуждения *3*. Основные полюсы возбуждения набирают из стальных пластин для облегчения их изготовления и уменьшения вихревых токов из-за пульсации поля, связанной с зубчатостью ферромагнитного якоря. Основная часть потока (рис. 15.1), создаваемого обмоткой возбуждения, замыкается через сердечник *2* северного полюса N, воздушный зазор, якорь *4*, сердечник южного полюса S и станину *1*. На рис. 15.2 показано распределе-

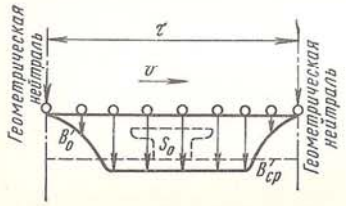

Рис. 15.2. Распределение нормальной к поверхности якоря составляющей индукции на развернутом полюсном делении

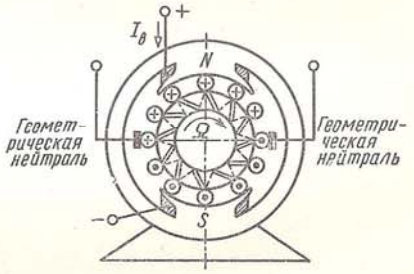

Рис. 15.3. Модель двухполюсной машины постоянного тока с кольцевым якорем

ние нормальной составляющей магнитной индукции B_0 в воздушном зазоре вдоль поверхности якоря. Под полюсами эта индукция наибольшая, посередине между полюсами она равна нулю. Плоскости, проходящие посередине между смежными полюсами, называют *геометрическими нейтралями*, а часть окружности якоря между геометрическими нейтралями — *полюсным делением* τ.

На рис. 15.3 изображена упрощенная модель машины постоянного тока с кольцевым якорем Такие конструкции применялись в 80-х годах XIX в. В настоящее время они не используются, и эту модель рассмотрим лишь для пояснения принципа действия машины постоянного тока. Кольцевой якорь машины представляет собой пустотелый стальной цилиндр с замкнутой обмоткой из изолированного провода. Цилиндр насаживается на вал и может вращаться в магнитном поле полюсов машины. Для создания электрического контакта подвижной обмотки якоря с внешней цепью наружная поверхность обмотки зачищена от изоляции и соприкасается с угольными щетками. Щетки укрепляют в неподвижном щеткодержателе и соединяют с зажимами якоря, к которым подключается внешняя цепь.

Допустим, что якорь машины приведен во вращение в направлении движения часовой стрелки с постоянной скоростью Ω, а внешняя цепь отключена (рис. 15.3). При вращении обмотки ее проводники, расположенные на внешней поверхности кольцевого якоря, будут пересекать магнитные линии поля статора и в них наведется э. д. с. $e = B_0 l v$, где B_0 — нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре; l — длина проводника; v — линейная скорость. Эту часть проводников обмотки называют *активными проводниками*. В проводниках обмотки, расположенных на внутренней и торцовых сторонах якоря, э. д. с. наводиться не будет, так как они не пересекают магнитных линий поля. Эти проводники служат только для последовательного соединения активных проводников и называются *соединительными*. Направление действия э. д. с. активных проводников может быть определено по правилу правой руки. Применяя это правило в рассматриваемом случае, можно убедиться, что направление действия э. д. с. во всех проводниках, движущихся в зоне северного полюса, будет одинаковым — от переднего торца якоря к заднему (рис. 15.3). Аналогичная картина будет наблюдаться и во второй половине обмотки, расположенной под горизонтальной плоскостью симметрии (под нейтралью), однако с тем отличием, что э. д. с. всех проводников, движущихся в зоне южного полюса, действуют в направлении от заднего торца якоря к переднему (рис. 15.3). В момент перехода активных проводников через геометрическую нейтраль э. д. с. в них наводиться не будет, так как они лишь скользят вдоль магнитных линий, а не пересекают их. При вращении якоря в его проводниках, перемещающихся из зоны одного полюса в зону другого полюса, наводятся переменные э. д. с.

Наложенные на якорь щетки делят его обмотку на две части с одинаковым числом последовательно соединенных проводников. Эти части обмотки называют *параллельными ветвями*. Параллельные ветви вращающейся якорной обмотки образуются активными проводниками, которые в данный момент находятся в зоне одного из полюсов.

Несмотря на то что э. д. с. в каждом активном проводнике вращающейся обмотки будет переменной, на щетках машины установится постоянное напряжение. Это объясняется тем, что направление действия э. д. с. в проводниках, образующих параллельную ветвь (рис. 15.4), сохраняется неизменным. В каждый момент времени значение э. д. с. определяется суммой мгновенных э. д. с. проводников между щетками.

Поскольку обмотка симметрична, э. д. с. одной параллельной ветви равна э. д. с. другой ветви. Направление действия этих э. д. с. по отношению к щеткам одинаково. Параллельные ветви якорной об-

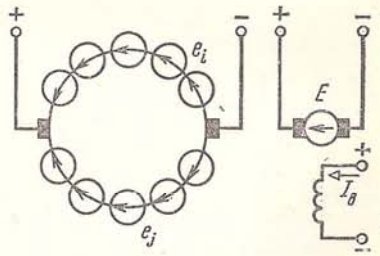

Рис. 15.4. Параллельные ветви обмоток якоря и условное графическое обозначение машины постоянного тока

мотки образуют замкнутый контур, в котором суммарная э. д. с. равна нулю, так как в этом контуре э. д. с. параллельных ветвей действуют навстречу друг другу. Поэтому в контуре обмотки ток не возникает. На схемах машина постоянного тока обозначается, как показано на рис. 15.4, где выделяются цепь якоря с условным изображением щеток и цепь возбуждения.

Вопрос 15.1. На рис. 15.1 изображено устройство машины постоянного тока. Приведя во вращение якорь машины от постоянного двигателя, создадим условия для генерирования э. д. с. на зажимах якоря. Как изменится значение э. д. с. при смещении щеток с геометрической нейтрали?

В рассмотренной модели щетки накладываются прямо на обмотку якоря. Однако такой упрощенный способ присоединения щеток к якорю не применяют. Во всех машинах постоянного тока соединение щеток с обмоткой якоря осуществляют с помощью коллектора, обеспечивающего постоянное напряжение на щетках. Коллектор (рис. 15.5) представляет собой устройство, состоящее из нескольких десятков медных клинообразных пластин (ламелей), изолированных друг от друга слюдяными прокладками. Пластины удерживаются обжимными шайбами. Каждая пластина коллектора имеет короткий выступ, к которому припаивают проводники, соединенные с витками якорной обмотки. Коллектор укрепляется на валу якоря и вращается вместе с якорем. Щетки накладываются на коллектор и располагаются на геометрических нейтралях. Таким образом, с помощью коллектора и щеток обмотка якоря машины соединяется с внешней электрической цепью.

Кольцевой якорь со спиральной обмоткой в настоящее время не применяется, так как при такой конструкции больше половины длины проводника является неактивной, что удорожает стоимость машины. Современные машины имеют барабанный якорь (рис. 15.6), в котором продольные стороны каждого витка уложены в пазы на внешней поверхности якоря под смежные полюсы на расстояние полюсного деления. Благодаря этому э. д. с. всей обмотки почти удваивается. Неактивными являются только «лобовые» части витков. Для увеличения э. д. с. якоря обмотки катушки выполняют многовитковыми.

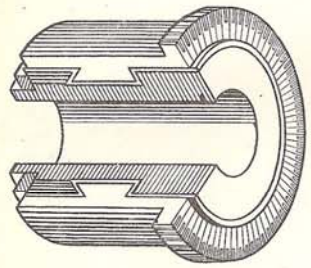

Рис. 15.5. Коллектор (разрез)

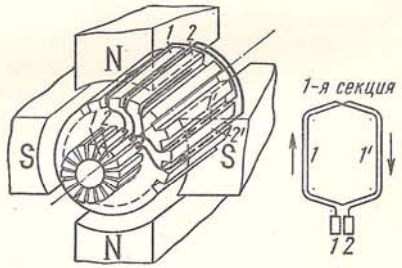

Рис. 15.6. Начало укладки обмотки в пазы на поверхности якоря четырехполюсной машины постоянного тока

§ 15.3. Режимы работы машины постоянного тока

Как отмечалось, электрическая машина может работать в режиме генератора или двигателя.

При работе в режиме генератора к выводам обмотки приведенного во вращение якоря присоединяется нагрузка. Тогда под действием э. д. с. якоря в обмотке возникнет ток (рис. 15.7). Напряжение на

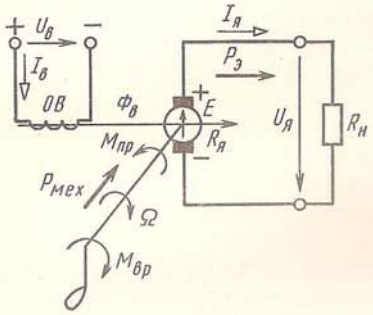

Рис. 15.7. Работа машины постоянного тока в режиме генератора

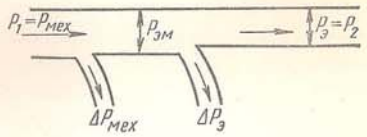

Рис. 15.8. Энергетическая диаграмма машины в режиме генератора

зажимах генератора $U = E - R_я I_я$, где $R_я$ — сопротивление цепи обмотки якоря. Умножив обе части этого выражения на $I_я$, получим уравнение баланса мощностей цепи якоря генератора: $UI_я = EI_я - R_я I_я^2$, где $UI_я$ — электрическая мощность, отдаваемая в приемник ($P_э$); $EI_я$ — электромагнитная мощность генератора ($P_{эм}$); $R_я I_я^2$ — мощность электрических потерь якорной цепи ($\Delta P_э$). Уравнение баланса мощностей генератора (без учета мощности магнитных потерь и мощности возбуждения) иллюстрируется энергетической диаграммой рис. 15.8.

Проводники обмотки якоря, в которых возник ток (направленный, как показано на рис. 15.3), находятся в магнитном поле, поэтому в соответствии с законом Ампера создаются электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Нетрудно убедиться (см. рис. 15.3), что эти силы создают электромагнитный момент $M_{пр}$, направленный противоположно моменту приводного двигателя. Таким образом, при работе генератором машина создает противодействующий электромагнитный момент $M_{пр}$, который должен быть преодолен первичным двигателем ($M_{вр}$).

Вопрос 15.2. При испытаниях генератора постоянного тока были определены $U = 220$ В, $I = 64$ А, $R_я = 1$ Ом. Найдите момент приводного двигателя, вращающего генератор с угловой скоростью $\Omega = 157$ с$^{-1}$.

Рассмотрим работу электрической машины в режиме двигателя постоянного тока. Для этого необходимо на щетки машины подать напряжение от внешнего источника питания (рис. 15.9). Допустим,

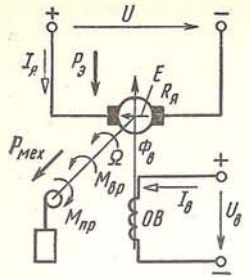

Рис. 15.9. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя

что направление тока в цепи якоря такое, как указано на рис. 15.3. Поскольку на каждый проводник с током, находящийся в магнитном поле, всегда действует электромагнитная сила, якорь двигателя придет во вращение против часовой стрелки. При вращении якоря в его обмотке наводится э. д. с. В соответствии с правилом правой руки найдем, что в каждом проводнике якоря ток и э. д. с. направлены навстречу друг к другу. Поэтому э. д. с. якоря двигателя обычно называют *противо-э. д. с.* Таким образом, машина постоянного тока, работающая в режиме двигателя, создает противо-э. д. с. Напряжение, приложенное к зажимам обмотки якоря двигателя, равно сумме противо- э. д. с. и падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря: $U = E + R_я I_я$.

Для изменения направления вращения якоря двигателя (реверсирования) необходимо изменить направление тока в обмотке якоря или в обмотке возбуждения. Убедитесь в справедливости этого, применив правило левой руки.

По аналогии с генератором уравнение баланса мощностей в цепи якоря двигателя получим в виде $UI_я = EI_я + R_я I_я^2$. Это уравнение иллюстрируется энергетической диаграммой рис. 15.10.

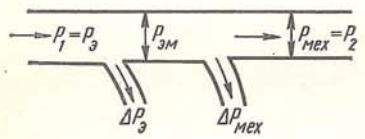

Рис. 15.10. Энергетическая диаграмма машины в режиме двигателя

Таким образом, машина постоянного тока может работать как генератором, так и двигателем. При работе генератором механическая энергия приводного двигателя преобразуется в электрическую энергию постоянного тока, а при работе двигателем электрическая энергия преобразуется в механическую. Следовательно, в электрической машине постоянного тока направление преобразования энергии может быть изменено на обратное. Это свойство называют *обратимостью машины*.

Вопрос 15.3. Двигатель постоянного тока (см. рис. 15.9), преодолевая противодействующий момент $M_{пр}$ нагрузки на валу, вращается равномерно. При резком увеличении $M_{пр}$ двигатель останавливается и затем начинает вращаться в обратную сторону. В каком режиме работает при этом машина?

§ 15.4. Электродвижущая сила якоря

Ранее было показано, что э. д. с. якоря машины определяется как алгебраическая сумма мгновенных э. д. с. проводников одной параллельной ветви обмотки якоря. Обозначив общее число проводников якоря N, а число параллельных ветвей $2a$, найдем э. д. с. одной параллельной ветви:

$$E = \sum_{i=1}^{N/2a} l_i = l_я v \sum_{i=1}^{N/2a} B_{0\,i} = B_{ср} l_я v \frac{N}{2a}, \qquad (15.1)$$

где $l_я$ — активная длина одного проводника обмотки якоря; $B_{ср}$ — среднее значение магнитной индукции на полюсном делении:

$$B_{ср} = \frac{1}{N/(2a)} \sum_{i=1}^{N/2a} B_{0i}.$$

С другой стороны, $B_{ср}$ можно выразить через поток Ф:

$$B_{ср} = \frac{Ф}{\tau l_я}.$$

Здесь Ф — магнитный поток одного полюса; $2p$ — число полюсов; τ — полюсное деление; $N/(2a)$ — число проводников одной параллельной ветви якоря; $v = D\Omega/2$ — линейная скорость движения проводников якоря (D — диаметр якоря).

Подставляя в (15.1) выражение $B_{ср}$, получим

$$E = c_E \Omega Ф,$$

где $c_E = pN/(2\pi a)$.

Следовательно, э. д. с. якоря машины постоянного тока пропорциональна магнитному потоку машины и угловой скорости якоря.

При постоянной скорости якоря э. д. с. E зависит только от магнитного потока полюса, т. е. от тока возбуждения. Зависимость $E(I_в)$ называется *характеристикой холостого хода генератора* и является, по существу, *характеристикой магнитной цепи машины* $Ф(I_в)$. Опытная характеристика холостого хода, снятая при плавном изменении $I_в$ от нуля до максимума и снова до нуля, представляет собой очень узкую петлю гистерезиса, которая при расчетах заменяется одной кривой (рис. 15.11). При отсутствии тока возбуждения в якоре машины наводится небольшая э. д. с. $E_{ост}$ (2—3% от номинального напряжения) от поля остаточной намагниченности машины.

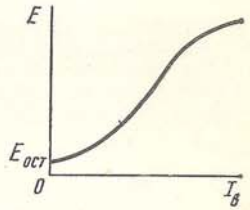

Рис. 15.11. Характеристика холостого хода генератора

Вопрос 15.4. Как изменится э. д. с. на зажимах обмотки якоря (см. рис. 15.3), если изменить направление вращения приводного двигателя и уменьшить ток в обмотке возбуждения?

§ 15.5. Электромагнитный момент машины

При вращении якоря генератора постоянного тока с постоянной угловой скоростью $\Omega = 2\pi n/60$ (где n — частота вращения, об/мин) вращающий момент приводного двигателя равен электромагнитному моменту генератора, т. е. $M_{вр} = M_{эм} = M$.

Как известно, произведение момента на угловую скорость равно мощности, поэтому механическая мощность двигателя равна электромагнитной мощности генератора. Тогда

$$P_{эм} = EI_я = M\Omega.$$

Отсюда

$$M = \frac{EI_я}{\Omega} = \frac{\frac{pN}{2\pi a}\Omega\Phi I_я}{\Omega} = c_M I_я \Phi, \qquad (15.2)$$

где

$$c_M = c_E = pN/(2\pi a).$$

Следовательно, электромагнитный момент машины постоянного тока пропорционален току якоря и потоку полюса. Он является вращающим в двигателе и противодействующим (тормозным) в генераторе.

При этом если мощность выражать в ваттах, то выражение, определяющее соотношения мощности на валу, электромагнитного момента (Н · м) и частоты вращения (об/мин), можно представить в виде

$$P_{ном} = \frac{1}{9{,}55} M_{ном} n_{ном}.$$

Номинальный момент и э. д. с. якоря могут быть определены по паспортным данным машины, к которым относятся номинальные мощность $P_{ном}$, напряжение $U_{ном}$, ток якоря $I_{ном}$, сопротивление обмотки якоря $R_я$, частота вращения $n_{ном}$.

Пример 15.1. Если на паспортном щитке двигателя (см. рис. 15.9) имеются следующие данные: номинальная мощность $P_{ном}$ (кВт), номинальный ток якоря $I_{ном}$ (А), номинальное напряжение на якорной обмотке $U_{ном}$ (В), сопротивление цепи якоря $R_я$ (Ом) и номинальная частота вращения якоря $n_{ном}$ (об/мин), то номинальный момент (Н · М) может быть подсчитан по формуле

$$M_{ном} = 9{,}55 \frac{P_{ном}}{n_{ном}}.$$

Противо-э. д. с. может быть найдена из уравнения электрического состояния якорной цепи.

§ 15.6. Способы возбуждения машин постоянного тока. Искрение на коллекторе

Обмотка возбуждения (рис. 15.12) и обмотка якоря в машинах постоянного тока могут быть включены в сеть различными способами: независимо одна от другой, параллельно и последовательно. В зависимости от способа соединения этих обмоток различают четыре типа машин постоянного тока:

1) машины независимого возбуждения (рис. 15.12, *а*), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря подключаются к различным источникам;

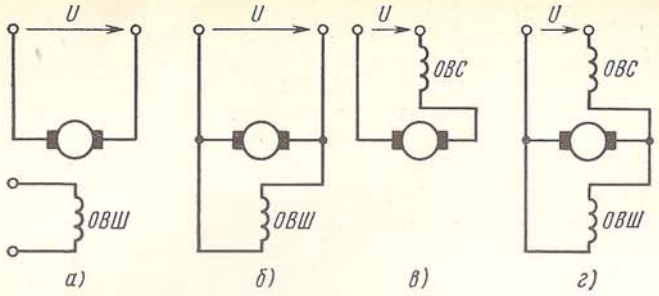

Рис. 15.12. Схемы возбуждения машин постоянного тока

2) машины параллельного (шунтового) возбуждения (рис. 15.12, *б*), в которых обмотка возбуждения подсоединяется к щеткам. Полюсные катушки машин с независимым и шунтовым возбуждением выполняются относительно тонким проводом со значительным числом витков;

3) машины последовательного (сериесного) возбуждения (рис. 15.12,*в*), в которых обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря. Обмотка возбуждения выполняется толстым проводом с малым числом витков;

4) машины смешанного (компаундного) возбуждения, в которых на каждом полюсном сердечнике имеется две катушки — шунтовая и сериесная. Шунтовая обмотка возбуждения соединяется параллельно якорной обмотке, а сериесная — последовательно с ней (рис. 15.12, *г*).

Способ соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря оказывает сильное влияние на электрические свойства генераторов и механические свойства двигателей постоянного тока.

Вопрос 15.5. Напряжение на зажимах генератора смешанного возбуждения (рис. 15.2,*г*) U = 115 В. Определите э. д. с. генератора, если ток (в обмотке ОВС) I = 50 А, $n_{ном}$ = 500 об/мин и $R_я$ = 0,0755 Ом, $R_{ОВС}$ = 0,04 Ом, $R_{ОВШ}$ = 39 Ом (механическими потерями пренебречь).

При работе машин постоянного тока в месте контакта щеток и вращающегося коллектора может возникать искрение — искровой или дуговой разряд, появляющийся при размыкании цепи постоянного тока, обладающий индуктивностью.

Разрыв в цепи тока якоря (при переходе щетки с одной ламели коллектора на другую или при отрыве щетки от коллектора из-за недостаточно ровной поверхности контакта) приводит в соответствии с законами коммутации к появлению значительного напряжения между щеткой и коллектором, которое вызывает пробой воздушного промежутка между краями щеток и коллектором — искрение. При интенсивном искрении разрушаются поверхности щеток и коллектора, увеличивается переходное сопротивление скользящего контакта между ними, начинается местный нагрев, что вызывает дальнейшее разрушение щеточно-коллекторного перехода.

Искрение создает радиопомехи, оно недопустимо при работе машин во взрывоопасных средах. Возможность искрения снижает надежность машин постоянного тока.

Для борьбы с искрением необходимо:

1) следить за поверхностью коллектора, не допускать неровностей цилиндрической поверхности, образованной ламелями, содержать поверхность в чистоте; следить за качеством закрепления щеток в щеткодержателях, правильностью выбора пружин, прижимающих щетку к коллектору; не допускать вращения якоря в направлении, обратном указанному на машине, так как при этом щетки могут неплотно прижиматься к коллектору;

2) принимать меры к уменьшению э. д. с., наводимой в контуре, образованном секцией обмотки и замыкающей ламели *1* и *2* щеткой (см. рис. 15.6). Эта э. д. с. наводится при движении секции в магнитном поле и вызывает ток $i_к$ секции в момент ее замыкания щеткой. При дальнейшем движении якоря секция размыкается (щетка перестает замыкать ламели *1* и *2* коллектора на рис. 15.6), т. е. происходит разрыв цепи, в которой существует ток $i_к$, и возникает искрение. Если в магнитной цепи машины создать (с помощью дополнительных полюсов) магнитное поле, равное по величине и противоположное по направлению полю токов якоря, то суммарная э. д. с. в коммутируемом контуре будет равна нулю и искрения по этой причине не будет.

Дополнительные полюсы устанавливают на геометрических нейтралях машины так, чтобы магнитный поток, созданный ими, был направлен навстречу потоку якоря. Катушки возбуждения добавочных полюсов включают последовательно в цепь якоря, так что с ростом тока якоря увеличиваются поток поля якоря и противоположный ему поток поля добавочных полюсов. Все современные машины постоянного тока мощностью более 1 кВт имеют добавочные полюсы.

§ 15.7. Генератор независимого возбуждения

В условиях эксплуатации важно знать основные характеристики машины, выражающие зависимость одних переменных величин от других. Для генераторов основными являются внешняя характеристика $U(I)$, т. е. зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянных скорости $\Omega = \Omega_{ном}$ и токе возбуждения $I_в = I_{в.ном}$, и характеристика холостого хода, показывающая связь между э. д.с. якоря и током возбуждения при постоянной скорости $\Omega = \Omega_{ном}$. Характеристика $E(I_в)$ снимается при $I_я = 0$ и $\Omega = \text{const}$ и в другом масштабе представляет собой график $\Phi(I_в)$, так как э. д. с. E пропорциональна Φ (см. рис. 15.11). На рис. 15.13 приведена схема генератора независимого возбуждения с включением измерительных приборов, позволяющих снять его внешнюю характеристику.

Внешняя характеристика генератора $U(I)$ при $I_в = \text{const}$ и $\Omega = \text{const}$ показывает изменение напряжения генератора при изменении нагрузки (рис. 15.14). Изображенная в относительных единицах характеристика позволяет видеть, что при увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора снижается. Это происходит за

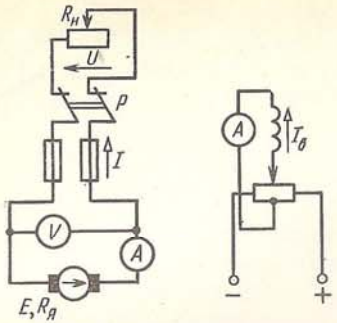

Рис. 15.13. Схема генератора независимого возбуждения

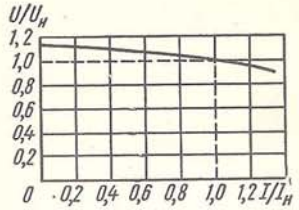

Рис. 15.14. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

счет увеличения падения напряжения на внутренних сопротивлениях цепи якоря, так как $U = E - R_я I$, а также вследствие уменьшения э. д. с. якоря (с ростом тока якоря увеличивается магнитное поле, возбуждаемое этим током. Поле обмотки якоря искажает основное поле машины, что приводит к некоторому уменьшению основного магнитного потока). Таким образом, с ростом тока нагрузки э. д. с. машины несколько уменьшается. При номинальной нагрузке напряжение генератора на 8—10% меньше напряжения холостого хода. При уменьшении сопротивления нагрузки до нуля генератор переходит в режим короткого замыкания, причем ток в якоре может достичь недопустимо большого значения.

Вопрос 15.6. Как изменится напряжение генератора (см. рис. 15.13) в режиме холостого хода, если при неизменном значении $I_в$ вдвое уменьшить угловую скорость приводного двигателя?

Вопрос 15.7. К зажимам генератора постоянного тока (см. рис. 15.13), имеющего внешнюю характеристику вида рис. 15.14, подключен приемник. Как изменятся ток якоря и противодействующий момент генератора, если уменьшить ток возбуждения машины при постоянстве угловой скорости ее якоря и сопротивления $R_н$?

§ 15.8. Генераторы с самовозбуждением

Одним из недостатков генераторов независимого возбуждения является то, что для их работы необходимо иметь отдельный источник, питающий цепь возбуждения. Однако напряжение генератора возможно получить и без дополнительного источника. Для этого используют, например, схему параллельного включения обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Рассмотрим условия и процесс самовозбуждения (появления напряжения на зажимах якоря) такого генератора, который называют генератором с самовозбуждением (рис. 15.15). Если привести во вращение якорь машины при условии, что внешняя цепь разомкнута (холостой ход), то на зажимах обмотки якоря может появиться постоянная э. д. с.

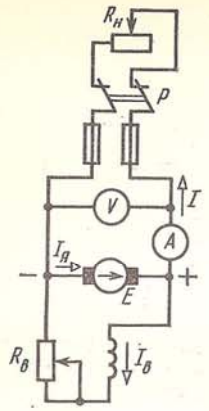

Рис. 15.15. Схема генератора параллельного возбуждения

Для самовозбуждения генератора необходимо, во-первых, наличие хотя бы слабого магнитного поля его магнитной цепи (первое условие возбуждения). После изготовления машины на заводе ее магнитную цепь предварительно намагничивают, подключая обмотку возбуждения к источнику постоянного напряжения. При отключении обмотки возбуждения в магнитной цепи машины сохраняется поток остаточного намагничивания, составляющий 2—3% от номинального потока. Если привести якорь во вращение, то в обмотке якоря поток остаточного намагничивания $\Phi_{ост}$ наведет слабую (несколько вольт) э. д. с. $E_{ост}$. Однако она достаточна для того, чтобы вызвать в цепи обмотки возбуждения, подключенной к якорю, начальный ток. Начальный ток возбуждения увеличивает поток возбуждения Ф, а вместе с ним увеличивается и э. д. с. якорной обмотки. Поэтому ток возбуждения продолжает увеличиваться, магнитный поток и э. д. с. снова возрастают и т. д. В этом и заключается процесс самовозбуждения, который заканчивается, когда падение напряжения в обмотке возбуждения (характеризуемое прямой $U_в = R_в I_в$) становится равным э. д. с. якоря, т. е. $E = R_в I_{в1}$ (рис. 15.16).

Вторым условием самовозбуждения является совпадение по направлению возбуждаемого и остаточного потоков. Если напряжения на зажимах вращающегося якоря не возникает, то необходимо изменить или направление вращения машины, или полярность присоединения концов обмотки возбуждения.

Третье условие самовозбуждения определяет значение сопротивления $R_в$ цепи возбуждения, т. е. угол наклона α прямой $U_в = R_в I_в$ к оси абсцисс (рис. 15.16). Если уменьшать $I_в$, например вводя реостат в цепь возбуждения, то точка пересечения A сместится влево. При

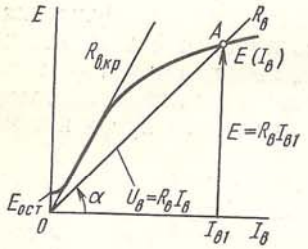

Рис. 15.16. Установившееся значение э. д. с. E_0 при $R_в$ = const

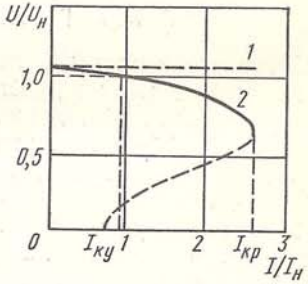

Рис. 15.17. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

достаточно большом сопротивлении цепи возбуждения, называемом критическим, напряжение на зажимах генератора неустойчиво и практически не превышает э. д. с. $E_{ост}$. Таким образом, по третьему условию самовозбуждения, сопротивление цепи возбуждения генератора должно быть меньше критического.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения $U(I)$ при $R_в$ = const и Ω = const (кривая *2* на рис. 15.17) проходит ниже, чем при независимом возбуждении (кривая *1*). Это объясняется уменьшением тока возбуждения при снижении напряжения с ростом тока нагрузки. Снижение напряжения при номинальной нагрузке составляет 10—15% от $E_{ном}$.

При дальнейшем плавном росте тока нагрузки падение напряжения на якоре вызывает уменьшение тока возбуждения, т. е. основного магнитного потока, что, в свою очередь, приводит к уменьшению э. д. с., так что ток нагрузки, достигнув своего наибольшего значения $I_{кр}$ (критическое значение), самопроизвольно падает вместе с резким снижением напряжения до нуля. Защита генераторов должна отключить цепь якоря, как только ток якоря превысит номинальный примерно в два раза.

Генераторы последовательного возбуждения не нашли широкого применения в практике из-за непостоянства выходного напряжения, поэтому их характеристики не рассматриваются.

В генераторе смешанного возбуждения (рис. 15.18) из-за применения последовательной обмотки возбуждения удается получить практически постоянное напряжение при изменениях нагрузки от нуля до номинального значения (кривая *1* на рис. 15.19). Путем соответствующего подбора числа витков последовательной обмотки можно скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и уменьшение э. д. с. от снижения тока возбуждения приращением

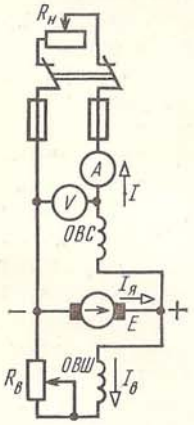

Рис. 15.18. Схема генератора смешанного возбуждения

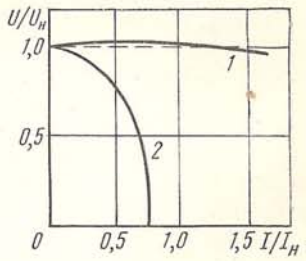

Рис. 15.19. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения

э. д. с. от потока последовательной обмотки. При этом соединение последовательной обмотки с якорем должно быть согласным, т. е. потоки последовательной и параллельной обмоток должны складываться. При встречном включении обмоток напряжение генератора при нагрузке резко падает (кривая *2* на рис. 15.19).

§ 15.9. Пуск двигателей постоянного тока

Различают три способа пуска двигателей постоянного тока:

1) прямой, при котором обмотка якоря непосредственно подключается к сети;

2) реостатный с помощью пускового реостата, который включается в цепь якоря и ограничивает ток при пуске;

3) при пониженном напряжении, подводимом к якорю от источника с регулируемым напряжением (например, в системе генератор — двигатель).

В двигателях постоянного тока падение напряжения $R_я I_{ном}$ в цепи якоря обычно составляет 5—10% от $U_{ном}$. Поэтому при прямом пуске из-за отсутствия в первый момент в обмотке якоря неподвижного двигателя противо-э. д. с. ($E = c_E \Phi \Omega$) пусковой ток $I_п = U_{ном}/R_я$ будет недопустимо большим: $I_п = (10 \div 20) I_{ном}$, что создает большой толчок момента, действующего на рабочий механизм, и может привести к поломке вала машины. По этой причине прямой пуск применяется для двигателей малой мощности (до 1 кВт), у которых сопротивление $R_я$ относительно велико, разгон происходит быстро (менее 1 с) и обмотка якоря не успевает нагреться, а толчок момента оказывается небольшим.

Наибольшее распространение получил реостатный пуск. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя включают специальный пусковой реостат $R_{доб}$, сопротивление которого выбирают с таким расчетом, чтобы пусковой ток не превышал $(2 \div 2{,}5) I_{ном}$. По мере разгона якоря двигателя возрастает его противо-э. д. с., уменьшаются ток и момент, развиваемый двигателем. Когда он становится равным моменту сопротивления на валу, возрастание скорости прекращается ($\Omega = \text{const}$). Пусковой реостат $R_{доб}$ предназначен для кратковременной работы, поэтому по мере увеличения частоты вращения двигателя пусковой реостат выводят, что вызывает рост тока и вращающего момента, превышающего момент сопротивления, и дальнейшее возрастание скорости. Пусковые качества двигателя тем выше, чем больше его пусковой момент при пусковом токе, не превышающем допустимый. Пуск происходит быстро и легко, если двигатель развивает пусковой момент, превышающий момент сопротивления на валу. Поэтому пуск производят при максимальном магнитном потоке, для чего перед пуском необходимо полностью вывести регулировочный реостат $R_в$ в цепи возбуждения. Ограничение пускового тока достигается также в случае пуска при пониженном напряжении U, подводимом к якорю двигателя от источника с регулируемым напряжением (в системе генератор — двигатель) (см. рис. 15.25).

Вопрос 15.8. Как зависит пусковой ток двигателя от нагрузки на валу (тормозного момента и момента инерции устройств, приводимых во вращение)?

§ 15.10. Механическая характеристика. Регулирование скорости двигателей постоянного тока

Зависимость установившейся угловой скорости от момента на валу двигателя при постоянном напряжении и сопротивлении цепи якоря ($R_я + R_{доб}$) называется *механической характеристикой двигателя*.

Для получения уравнения механической характеристики вспомним, что $\Omega = E/(c\Phi)$. Кроме того, поскольку $E = U - (R_я + R_{доб}) I_я$, угловая скорость $\Omega = [U - (R_я + R_{доб}) I_я]/(c\Phi)$. Ток якоря $I_я$ определяется моментом на валу и магнитным потоком полюса, т. е. $I_я = M/(c\Phi)$. Тогда уравнение механической характеристики запишется в виде

$$\Omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_я + R_{доб}}{c^2\Phi^2} M \quad \text{или} \quad \Omega = \Omega_0 - \frac{R_я + R_{доб}}{c^2\Phi^2} M. \qquad (15.3)$$

Видно, что регулировать скорость двигателя можно тремя способами: 1) включением реостата $R_{доб}$ в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование); 2) изменением магнитного потока Φ (полюсное регулирование); 3) изменением питающего напряжения U (якорное регулирование).

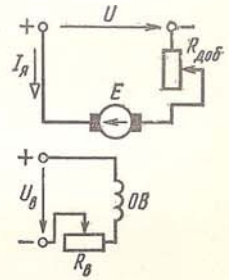

Рис. 15.20. Схема двигателя независимого возбуждения

Рассмотрим эти способы регулирования скорости на примере двигателей параллельного (рис. 15.21) и независимого (рис. 15.20) возбуждения при постоянном моменте нагрузки на валу ($M_c = \text{const}$). Из уравнения механической характеристики видно, что зависимость скорости двигателя от момента выражается прямой линией, которая при $R_{доб} = 0$, $\Phi = \Phi_{ном}$ и $U = U_{ном}$ называется *естествен-*

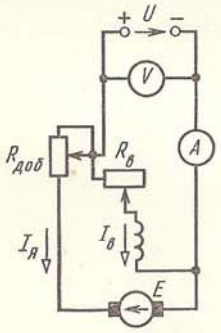

Рис. 15.21. Схема двигателя параллельного возбуждения для снятия механических характеристик

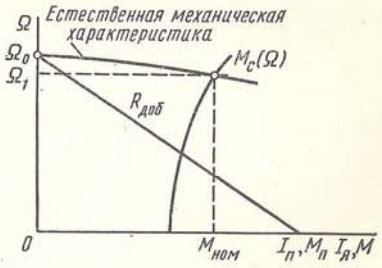

Рис. 15.22. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

ной механической характеристикой (рис. 15.22). Это очень пологая прямая, так как при нагрузках на валу до номинальной скорость двигателя уменьшается на 5 ÷ 7% от Ω_0 пропорционально падению напряжения на внутреннем сопротивлении якоря. Такая естественная механическая характеристика называется жесткой.

При реостатном регулировании скорость двигателя изменяется с помощью реостата $R_{доб}$, включаемого последовательно с якорем. Изменяя $R_{доб}$, можно получить семейство искусственных механических характеристик, более мягких, чем естественная механическая характеристика двигателя. Все эти характеристики будут пересекать ось ординат в одной и той же точке, соответствующей скорости идеального холостого хода Ω_0 (рис. 15.22). Из графика видно, что чем больше $R_{доб}$, тем круче с увеличением нагрузки падает скорость двигателя. Очевидно, данный метод позволяет уменьшать скорость по сравнению со скоростью при естественной характеристике.

Реостатный способ регулирования скорости находит достаточно широкое применение, так как позволяет получить любую пониженную скорость при заданном моменте нагрузки на валу. Однако он имеет и недостатки — мягкие механические характеристики, которые затрудняют получение требуемой скорости при различных нагрузках. Кроме того, в реостате $R_{доб}$ существует ток якоря $I_я$, что обусловливает значительные потери $R_{доб}I_я^2$ в цепи якоря. По этой причине регулирование скорости двигателя включением реостата в цепь якоря применяют лишь для двигателей небольших мощностей.

При полюсном регулировании скорости двигателя для изменения магнитного потока необходимо регулировать ток возбуждения двигателя, что достигается с помощью реостата $R_в$, включенного в цепь шунтовой обмотки (см. рис. 15.21). Как следует из уравнения механической характеристики, скорость идеального холостого хода Ω_0 изменяется обратно пропорционально потоку возбуждения. При значительном уменьшении потока возбуждения ток якоря $I_я$ и скорость ненагруженного двигателя резко увеличиваются, что может привести к механическому повреждению двигателя. Поэтому двигатели снабжают автоматической защитой, которая отключает их от сети при чрезмерном уменьшении тока возбуждения. На рис. 15.23 приведены механическая характеристика рабочего механизма $M_c(\Omega)$ и искусственные механические характеристики двигателя при различных значениях потока возбуждения. Из уравнения механической характеристики видно, что каждому значению потока соответствует свое значение Ω_0 и $M_п$. Этот способ регулирования скорости особенно эффективен при небольших моментах нагрузки, так как позволяет изменять поток возбуждения в широких пределах (пока ток якоря $I_я$ не превысит номинального значения). При моментах нагрузки, близких к номинальному, ток якоря с уменьшением потока превышает номинальное значение, что недопустимо при длительном режиме работы машины.

Одним из преимуществ полюсного регулирования скорости является его экономичность, так как из-за относительно малой мощности обмотки возбуждения небольшими оказываются и дополнительные потери мощности в регулировочном реостате. К преимуществам следует

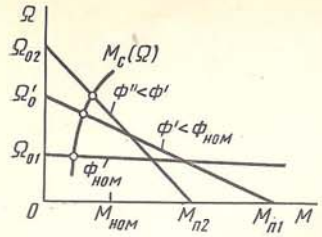

Рис. 15.23. Механические характеристики двигателя при полюсном регулировании скорости

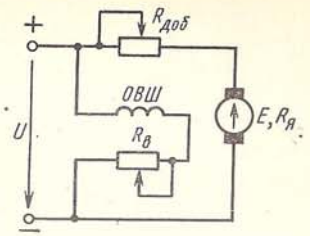

Рис. 15.24. Схема двигателя параллельного возбуждения

отнести также достаточно жесткие механические характеристики, что облегчает получение требуемых скоростей, поскольку последние мало зависят от нагрузки двигателя. Недостатком полюсного регулирования является то, что регулирование скорости путем изменения магнитного потока можно производить лишь в области, расположенной выше естественной механической характеристики, в то время как во многих случаях требуются пониженные скорости.

Вопрос 15.9. Как изменятся частота вращения и ток якоря двигателя, изображенного на рис. 15.24, при увеличении сопротивлении реостата $R_в$ в цепи возбуждения (при этом момент нагрузки меньше номинального, а напряжение сети остается неизменным)?

В двигателях независимого возбуждения используют еще и якорное регулирование скорости (изменение напряжения на якоре безреостатным способом). Это осуществляется в системе генератор — двигатель (Г — Д), в которой источником регулируемого напряжения может быть полупроводниковый преобразователь на тиристорах или генератор независимого возбуждения *Г* (рис. 15.25), вращаемый с постоянной скоростью приводным (например, асинхронным) двигателем *ПД*. Обмотки возбуждения генератора и двигателя *Д* питаются от источника постоянного напряжения небольшой мощности *И*. Вал двигателя соединен с рабочим механизмом *РМ*. Изменить напряжение на якоре двигателя и, следовательно, регулировать его скорость мож-

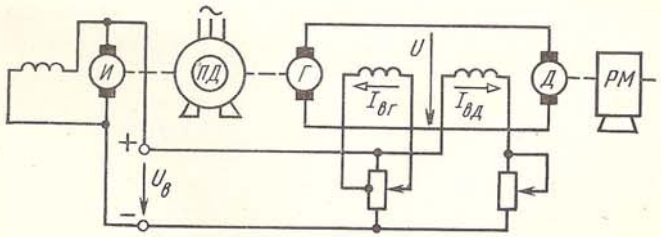

Рис. 15.25. Система генератор—двигатель

но, изменяя небольшой ток возбуждения генератора *Г*. Так как $E_Д \approx \approx E_Г$, т. е. $c_{ЕД}\Omega_Д\Phi_Д = c_{ЕГ}\Omega_Г\Phi_Г$, то $\Omega_Д$ пропорционально $\Phi_Г$.

Пусковой реостат в схеме не требуется, поскольку пуск начинается при пониженном напряжении, которое можно плавно повысить. Для реверсирования двигателя необходимо изменить направление тока возбуждения генератора.

Хотя система Г — Д дорогá (состоит из нескольких машин), она нашла широкое применение для привода мощных двигателей (напри-

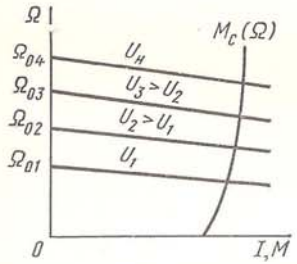

Рис. 15.26. Механические характеристики двигателя в системе генератор—двигатель

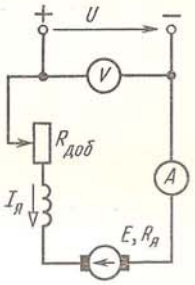

Рис. 15.27. Схема двигателя последовательного возбуждения

мер, прокатных станов), а также в системах автоматического регулирования. Искусственные механические характеристики двигателя в системе Г — Д и механическая характеристика рабочего механизма $M_c(\Omega)$ приведены на рис. 15.26.

Вопрос 15.10. Напряжение *U* сети, питающей двигатель (рис. 15.24,) понизилось. Как изменятся частота вращения и ток якоря при неизменной нагрузке на валу?

В двигателе последовательного возбуждения обмотка якоря и обмотка возбуждения соединены последовательно (рис. 15.27), поэтому ток якоря и ток возбуждения будут одинаковыми. Пока магнитная цепь машины не насыщена, магнитный поток Ф пропорционален току якоря ($\Phi \equiv I_я$), а поскольку вращающий момент двигателя пропорционален магнитному потоку и току ($M = c_M \Phi I_я$), можно считать, что вращающий момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока якоря ($M \equiv I_я^2$). Из уравнения механической характеристики (15.3) видно, что с ростом момента нагрузки на валу ток двигателя и поток увеличиваются, а скорость двигателя уменьшается по закону, близкому к гиперболическому. Такой двигатель характеризуется мягкими механическими характеристиками (рис. 15.28). При небольшом моменте нагрузки на валу двигателя (менее 25% от номинального) ток и поток двигателя уменьшаются, а его скорость, как следует из уравнения механической характеристики (15.3), резко возрастает — двигатель «идет вразнос» и может быть

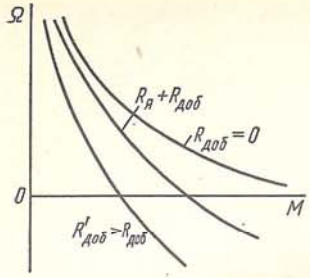

Рис. 15.28. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

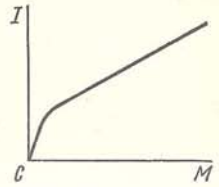

Рис. 15.29. Зависимость $I(M)$ для двигателя последовательного возбуждения

поврежден. Это требует такого сочленения двигателя с рабочим механизмом, при котором режим холостого хода был бы исключен. В частности, не применяются ременные передачи, так как при ослаблении или обрыве ремня может возникнуть аварийный режим. Зависимость тока от вращающего момента показана на рис. 15.29. Из графика видно, что кривая момента в начальной части имеет вид параболы, а при насыщении магнитной цепи двигателя вращающий момент изменяется почти пропорционально току. В двигателях последовательного возбуждения также применяют три способа регулирования скорости — реостатное, полюсное и изменением напряжения на зажимах двигателя. При реостатном регулировании используют регулировочный реостат вместо пускового, который рассчитан на кратковременный режим работы (рис. 15.30, *а*). Однако такой способ регулирования неэкономичен из-за больших потерь мощности в реостате. Более экономичным является регулирование изменением магнитного потока Ф. В этом случае регулировочным реостатом шунтируют обмотку возбуждения, вследствие чего магнитный поток Ф уменьшается, а скорость увеличивается (рис. 15.30, *б*). Регулирование изменением напряжения на зажимах двигателя широко применяется на транспорте (переключение с параллельного на последовательное соединение нескольких двигателей). При этом можно достичь широкого регулирования с относительно небольшими потерями энергии.

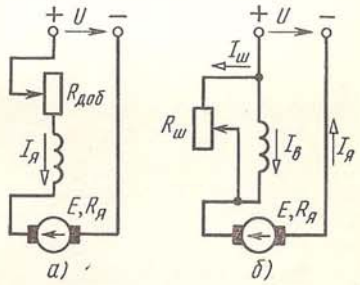

Рис. 15.30. Схемы для регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения

Вопрос 15.11. Напряжение *U* сети, питающей двигатель (рис. 15.30,*а*) понизилось. Как изменятся скорость и ток якоря при неизменной нагрузке на валу?

§ 15.11. Особенности использования двигателей постоянного тока

Как было показано, эксплуатационные характеристики (механические характеристики, перегрузочная способность, регулирование скорости, чувствительность к изменению напряжения якорной цепи) двигателей постоянного тока разных типов возбуждения существенно различаются, что и определяет области применения этих двигателей.

Двигатели независимого возбуждения, обладающие жесткой естественной механической характеристикой, допускающие глубокое и плавное регулирование скорости реостатным, полюсным и якорным способами, широко используют в мощных приводах (прокатных станах, рулевых механизмах судов и т. д.) и различных устройствах автоматики. Однако это целесообразно только при условии, что действительно необходимо глубоко и плавно, с хорошей чувствительностью регулировать угловую скорость рабочего механизма и осуществлять частое реверсирование.

Такой же жесткой механической характеристикой, но значительно меньшими возможностями регулирования скорости обладают двигатели параллельного (шунтового) возбуждения. Кроме того, они весьма чувствительны к нестабильности напряжения питающей сети, так как это обусловливает изменение тока якоря при неизменной нагрузке на валу. В силу указанных особенностей эти двигатели применяют в приводах металлорежущих станков, где требуется постоянство угловой скорости в определенном диапазоне изменения нагрузки. При эксплуатации двигателей независимого и параллельного возбуждения предусматривают автоматические устройства защиты якорных цепей от недопустимо больших токов. В двигателях параллельного возбуждения предусматривают также защиту от снижения напряжения на обмотке возбуждения ниже определенного предела.

Двигатели последовательного возбуждения, или двигатели смешанного возбуждения с преобладанием влияния последовательной обмотки возбуждения, обладающие мягкой механической характеристикой, допускающие значительные перегрузки по моменту на валу, позволяющие плавно и глубоко регулировать угловую скорость рабочего механизма, используют в качестве тяговых двигателей на электрифицированном транспорте, в лифтах, приводах тельферов и в других подъемно-транспортных механизмах. Их особенностью является необходимость обеспечения определенного момента сопротивления на валу, т. е. недопустимость работы в режиме холостого хода, так как при этом двигатель идет вразнос. Регулирование скорости и пуск этих машин осуществляют с помощью изменения сопротивления резистора, включенного в цепь якоря. Все переключения производят специальной пускорегулирующей аппаратурой (контроллером).

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ГЛАВЫ 15

15.1.1. Не изменится. **15.1.2.** Возрастет. **15.1.3.** Уменьшится. **15.2.1.** 115,7 Н · м. **15.2.2.** 89,7 Н · м. **15.2.3.** 63,6 Н · м. **15.3.1.** В режиме генератора. **15.3.2.** В режиме двигателя. **15.3.3.** В режиме электромагнитного тормоза.

15.4.1. Уменьшится до нуля. **15.4.2.** Уменьшится с изменением полярности. **15.4.3.** Возрастет. **15.5.1.** 113,2 В. **15.5.2.** 116,7 В. **15.5.3.** 121 В. **15.6.1.** Возрастет. **15.6.2.** Уменьшится вдвое. **15.6.3.** Уменьшится незначительно. **15.7.1.** Ток возрастет, момент не изменится. **15.7.2.** Ток и момент уменьшатся. **15.7.3.** Ток не изменится, момент уменьшится. **15.8.1.** Не зависит. **15.8.2.** Увеличивается с ростом нагрузки. **15.8.3.** Нет однозначного ответа. **15.9.1.** Частота вращения уменьшится, ток якоря не изменится. **15.9.2.** Частота вращения увеличится, ток якоря уменьшится. **15.9.3.** Изменение частоты вращения однозначно не определяется, ток якоря увеличится. **15.10.1.** Частота вращения уменьшится, ток якоря возрастет. **15.10.2.** Частота вращения уменьшится, ток якоря не изменится. **15.10.3.** Изменение частоты вращения однозначно не определяется, ток якоря возрастет. **15.11.1.** Скорость якоря уменьшится, ток якоря возрастет. **15.11.2.** Скорость якоря уменьшится, ток якоря не изменится. **15.11.3.** Изменение скорости якоря однозначно не определяется, ток якоря возрастет.

КОММЕНТАРИИ К ОТВЕТАМ НА ВОПРОСЫ ГЛАВЫ 15

15.1.1. Обратите внимание на рис. 15.3 и 15.4. Обмотка якоря разделена на две параллельные ветви. В витках, находящихся в зоне действия одного полюса, наводятся э. д. с. одного знака. Сумма э. д. с. витков одной параллельной ветви равна сумме э. д. с. витков второй параллельной ветви, так что схема замещения машины может быть представлена в виде рис. 15.31.

Если щетки сместить с геометрической нейтрали, то вновь образуются параллельные ветви, но их образующие витки теперь будут находиться в зоне действия как одного, так и другого полюса машины, т. е. в них будут наводиться э. д. с. разного знака (рис. 15.32). Следовательно, значение э. д. с. машины изменится. Вероятно, Вы поняли свою ошибку. Переходите к изучению последующего материала.

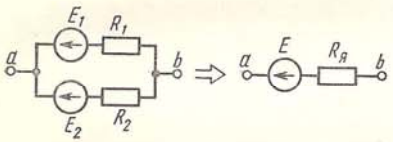

Рис. 15.31. Схема замещения машины с двумя параллельными ветвями

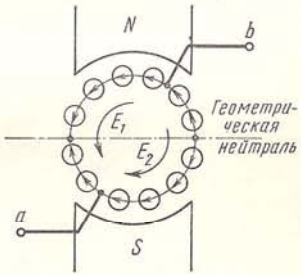

Рис. 15.32. Возникновение э. д. с. в проводниках параллельных ветвей обмотки якоря

15.1.2. Если внимательно рассмотреть рис. 15.4, то станет ясно, что при заданных условиях максимальная э. д. с. на щетках машины возможна только при их расположении на геометрической нейтрали. Изучите комментарий 15.1.1.

15.1.3. Действительно, при смещении щеток с геометрической нейтрали витки, образующие параллельную ветвь обмотки якоря машины, будут расположены в зоне действия разных полюсов, т. е. сумма э. д. с.

этих витков будет меньше (рис. 15.32). Продолжайте изучение материала.

15.2.1. При решении этой задачи необходимо воспользоваться энергетической диаграммой, т. е. учесть соотношение

$$P_{эм} = EI_я = UI_я + R_я I_я^2.$$

Определив мощность на выходе генератора ($P_2 = P_э$) и найдя мощность потерь в обмотке якоря $\Delta P_э$, можно определить электромагнитную мощность, т. е., пренебрегая механическими потерями и мощностью возбуждения, найти $M = P_{эм}/\Omega$. При этом действительно $M = 115{,}7$ Н · м.

15.2.2. Решая эту задачу (см. комментарий 15.2.1), Вы могли не учесть мощности потерь в обмотке якоря, т. е. считать $P_{эм} = P_э$. Это возможно при малом значении $R_я$, но в данном случае приводит к большой погрешности в определении момента приводного двигателя. Переходите к изучению последующего материала.

15.2.3. В режиме генератора уравнение электрического состояния якорной цепи имеет вид $U = E - R_я I_я$. Таким образом, в уравнении баланса мощностей необходимо учесть, что $P_{эм} = P_э + \Delta P_э$, т. е. $EI_я = UI_я = R_я I_я^2$.

Вы могли ошибиться в выборе знака. Необходимо быть внимательным при записи уравнения электрического состояния цепи в режиме генератора или двигателя. Изучите комментарий 15.2.1.

15.3.1. Режим генератора характеризуется тем, что момент приводного двигателя превышает противодействующий момент машины, при этом направления преобразования энергии можно показать стрелками, как это сделано на рис. 15.7. В данном случае машина развивает вращающий момент, преодолевающий возрастающее сопротивление нагрузки. Направление преобразования энергии противоположно показанному на рис. 15.7.

Изобразите стрелками направления преобразования энергии в схеме рис. 15.9 при условии, что $M_{пр} \geqslant M_{вр}$. Учтите при этом направление вращения ротора, показанное на рисунке. Затем изучите комментарий 15.3.3.

15.3.2. В режиме двигателя (см. рис. 15.9) электрическая энергия преобразуется в механическую, что приводит к указанному направлению вращения ротора. Отметим стрелками направление преобразования энергий ($P_э = UI_я$ и $P_{мех} = M\Omega$). Но в вопросе указано, что увеличение $M_{пр}$ вызывает останов двигателя и затем его вращение в обратную сторону. Следовательно, это уже не режим двигателя.

15.3.3. Действительно, машина будет работать в режиме, при котором она потребляет электрическую энергию (как двигатель) и механическую энергию (как генератор) и вся эта энергия преобразуется в теплоту (нагрев обмотки якоря). При этом машина развивает противодействующий момент, препятствующий внешней силе, вращающей якорь. В схеме рис. 15.9 для иллюстрации данного режима надо изменить направление Ω, т. е. изменить направление передачи механической энергии. Этот режим называют режимом электромагнитного тормоза. Уравнение баланса мощности для этого случая имеет вид $P_э + P_{мех} = \Delta P_э$ (мощностью механических потерь пренебрегаем).

Обратите внимание, что при изменении направления Ω изменится направление E. При этом направление тока $I_я$ останется неизменным (см. рис. 15.9), но изменится его значение.

15.4.1. Значение и направление э. д. с., наводимой в обмотке якоря, зависят от частоты и направления вращения якоря. Поэтому при уменьшении частоты вращения до нуля э. д. с. уменьшится до нуля. Но в вопросе приводной двигатель начинает вращаться в обратную сторону с некоторой скоростью. Поэтому Ваш ответ неверен. Исправьте ошибку и дайте правильный ответ.

15.4.2. Действительно, при изменении направления вращения якоря изменяется полярность наводимой э. д. с. Э. д. с. пропорциональна также интенсивности магнитного поля машины, т. е. при уменьшении магнитного потока, или тока возбуждения, э. д. с. уменьшается. Переходите к изучению последующего материала.

15.4.3. Возрастание э. д. с. машины возможно либо при увеличении частоты вращения якоря, либо при увеличении магнитного потока полюсов, т. е. при увеличении тока возбуждения. В вопросе такие условия не указаны. Поэтому изучите комментарий 15.4.2 и найдите свою ошибку.

15.5.1. Решение этой задачи сводится к расчету сложной цепи постоянного тока, содержащей активную ветвь. Для определения э. д. с. необходимо воспользоваться уравнением электрического состояния якорной цепи, предварительно определив ток якоря. Обратите внимание на необходимость изображения условного направления токов в схеме рис. 15.12, *г*.

При правильном выборе направления токов (если учесть, что рассматривается схема генератора) и правильной записи уравнений ответ получится иным. Найдите ошибку и дайте правильный ответ.

15.5.2. Для решения задачи необходимо задаться условным направлением токов в схеме рис. 15.12, *г*, учтя, что определяется э. д. с. генератора. После этого можно записать такую последовательность уравнений: 1) $E = U_я + R_я I_я$; 2) $I_я = I + I_{овш}$; 3) $I_{овш} = U_я/R_{овш}$; 4) $U_я = U + R_{овс} I$.

Решая эту последовательность в порядке, обратном написанному, получим 121 В. Найдите свою ошибку и продолжайте изучение материала.

15.5.3. Вы получили верный ответ. Можете сверить Ваше решение, прочтя комментарий 15.5.2. Переходите к изучению последующего материала.

15.6.1. Напряжение на выходе генератора в режиме холостого хода равно э. д. с. генератора. Зависимость э. д. с. от тока возбуждения (т. е. от магнитного потока) приведена на рис. 15.11. Заметим, что эта характеристика снимается при неизменной угловой скорости якоря генератора Ω, выражаемой в $с^{-1}$. Вспомним, что $E = c\Omega\Phi$, т. е. э. д. с. пропорциональна величине Ω, если магнитный поток (или ток $I_в$) остается неизменным. Вероятно, Вы уже поняли свою ошибку.

15.6.2. Поскольку $E = c\Omega\Phi$ и $\Phi = \text{const}$, действительно э. д. с.

уменьшится вдвое. Таким образом, при разных скоростях получатся различные зависимости $E(I_в)$.

15.6.3. Такой ответ необоснован, так как известно, что э. д. с. (именно она определяет напряжение холостого хода генератора) пропорциональна скорости якоря и магнитному потоку полюсов. При $I_в = \text{const}$, т. е. при неизменном потоке полюсов, э. д. с. пропорциональна Ω.

15.7.1. При решении этой задачи необходимо воспользоваться следующими положениями:

1) уравнение внешней характеристики генератора, изображенного на рис. 15.13, имеет вид $U = E - R_я I$;

2) величина $E = U_х$ при $I = 0$ зависит от скорости якоря и магнитного потока полюсов, т. е. от тока возбуждения;

3) при неизменном $R_н$ вольт-амперная характеристика приемника представляет собой прямую в координатах U, I;

4) тормозной момент, который развивает генератор, осуществляющий преобразование механической энергии в электрическую, определяется электромагнитной мощностью $P_{эм} = EI = M\Omega$ (если не учитывать механических потерь).

Постройте семейство внешних характеристик генератора с учетом изложенного. Изобразите линию в. а. х. резистивного приемника и дайте правильный ответ.

15.7.2. Изобразив семейство внешних характеристик генератора при $n = \text{const}$ и при различных значениях тока возбуждения ($U = E(I_в) - R_я I$), можно определить, как будет изменяться электрическое состояние резистивного приемника в зависимости от изменения $I_в$ (применив метод пересечения характеристик). Действительно, при уменьшении тока возбуждения ток якоря I', электрическая мощность ($U'I'$) и противодействующий момент ($M' = EI'/\Omega$) уменьшаются (рис. 15.33).

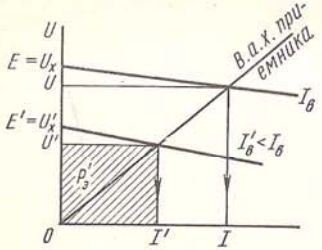

Рис. 15.33. Определение тока якоря генератора независимого возбуждения при уменьшении тока возбуждения

15.7.3. Такой ответ возможен при условии, что уменьшение тока $I_в$ сопровождается соответствующим уменьшением $R_н$. Из графического решения задачи (рис. 15.33) видно, что возможно такое уменьшение $R_н$, при котором ток I будет оставаться неизменным; точка пересечения внешней характеристики генератора при $I'_в$ и измененной в. а. х. приемника остается на линии $I = \text{const}$. Но при этом снижается напряжение U на выходе генератора и, следовательно, уменьшаются мощность $P_э$ и противодействующий момент машины. Однако в вопросе предполагалось $R_н = \text{const}$, поэтому выбранный Вами ответ неверен.

15.8.1. Пусковой ток определяется напряжением на якоре и сопротивлением цепи якоря. Следовательно, Ваш ответ верен. Заметьте

также, что при увеличении момента нагрузки увеличивается время разгона двигателя. Переходите к изучению последующего материала.

15.8.2. Ток якоря действительно пропорционален моменту на валу, но эта пропорциональность соблюдается лишь при равномерном вращении (динамическом равновесии) якоря машины. В момент пуска

$$I_п = U_я/(R_я + R_{доб}).$$

Пусковые токи не зависят от момента нагрузки. Продолжайте изучение материала данной главы.

15.8.3. Однозначный ответ есть. Изучите комментарии 15.8.2 и 15.8.1.

15.9.1. Вспомним уравнение механической характеристики двигателя:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi_в} - \frac{R_я + R_{доб}}{c_E\, c_M \Phi_в^2} M, \text{ где } c_E = \frac{pN}{60a}; \quad c_M = \frac{pN}{2\pi a}.$$

С увеличением $R_в$ уменьшается ток $I_в$, т. е. поток $\Phi_в$. Если момент нагрузки больше номинального, то, как показывает анализ рис. 15.23, частота вращения действительно может уменьшиться. Однако в реальных двигателях уменьшение $I_в$ приводит к увеличению n при моментах меньше номинального.

Что касается тока якоря, то здесь надо вспомнить, что для режима установившегося равномерного вращения $I_я = M/(c_M \Phi_в)$, т. е. Ваш ответ неверен. Уясните ошибку и дайте правильный ответ.

15.9.2. Обратите внимание на зависимость тока якоря от момента на валу и магнитного потока полюсов. Ваш ответ неверен. Изучите комментарий 15.9.1.

15.9.3. С увеличением $R_в$ уменьшается ток $I_в$ и, следовательно, поток $\Phi_в$, поэтому при $M = \text{const}$ ток якоря возрастает.

Анализ механической характеристики $n(M)$ показывает, что изменение n зависит от того, насколько существенны изменения

$$n_0 = \frac{U}{c_E \Phi_в} \text{ и } \Delta n = \frac{R_я + R_{доб}}{c_E\, c_M \Phi_в^2} M.$$

Однако в реальных двигателях параллельного возбуждения изменение Δn много меньше в сравнении с изменением n_0, поэтому уменьшение $I_в$ при $M < M_{ном}$ приводит к увеличению n. Продолжайте изучение материала данной главы.

15.10.1. Изменение U в данном случае приводит к уменьшению тока возбуждения двигателя и возрастанию тока якоря, так как $M = c_M I_я \Phi_в$. Следовательно, Вы правильно ответили на вопрос об изменении тока якоря. Что касается изменения частоты вращения, то для ответа на вопрос необходимо сравнить, в какой степени уменьшение напряжения и потока повлияет на величину n.

Исследуйте зависимость $n(M)$ и прочтите комментарий 15.10.3.

15.10.2. Ток якоря в режиме равномерного вращения определяется моментом на валу и потоком полюсов. При уменьшении напряжения уменьшается поток, поэтому Ваш ответ неверен. Изучите комментарий 15.10.1.

15.10.3. Рассматривая зависимость

$$n = \frac{U}{c_E \Phi_в} - \frac{R_я + R_{доб}}{c_E c_M \Phi_в^2} M,$$

можно заметить, что с уменьшением U уменьшается $n_0 = U/(c_E \Phi_в)$, однако одновременно с уменьшением U уменьшается и магнитный поток. Таким образом, однозначно предсказать изменение частоты вращения не представляется возможным.

Ток якоря в режиме равномерного вращения определяется выражением $I_я = M/(c_M \Phi_в)$. Следовательно, при $M = \text{const}$ уменьшение $\Phi_в$ приводит к росту $I_я$. Именно поэтому в двигателях параллельного возбуждения, работающих с номинальной нагрузкой, нельзя допускать снижения питающего напряжения. Двигатели будут быстро перегреваться ($I_я > I_{я.ном}$) и могут выйти из строя. Продолжайте изучение последующего материала.

15.11.1. Здесь рассматривается двигатель последовательного возбуждения. Поток возбуждения этого двигателя при постоянном моменте на валу определяется током якоря, т. е. ток якоря определяется только противодействующим моментом нагрузки и в данном случае неизменен ($M = c_M I_я \Phi_в \approx k I_я^2$). Рассматривая рис. 15.30, *а*, можно заметить, что при $I_я = \text{const}$ уменьшение U приводит к уменьшению E. Но э. д. с. E зависит от угловой скорости якоря и от магнитного потока, т. е. уменьшение U приводит к уменьшению Ω (при $\Phi_в = \text{const}$). Поэтому эта часть Вашего ответа верна. Переходите к дальнейшему изучению материала.

15.11.2. Действительно, при уменьшении напряжения сети уменьшается напряжение на якоре двигателя при условии, что момент на валу и, следовательно, ток якоря неизменны. Уменьшение $U_я$ приводит к уменьшению скорости якоря, тем самым автоматически поддерживается динамическое механическое равновесие и электрическое равновесие якорной цепи. Таким образом, Вы правильно выбрали ответ. Продолжайте изучение материала данной главы.

15.11.3. В данном случае рассматривается двигатель последовательного возбуждения и нельзя переносить результат анализа работы двигателя параллельного возбуждения (см. вопрос 15.10) для ответа на этот вопрос. Изучите комментарий 15.11.1.