Лекция – 4

1 РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока обладают свойством обратимости. Это означает, что одна и та же машина может выполнять функцию генератора электрической энергии и электродвигателя. Более того, в каком бы режиме не использовалась машина, она работает и как генератор, и как двигатель одновременно. При протекании тока нагрузки по обмоткам якоря генератора он создает тормозящий момент, а при вращении якоря электродвигателя в обмотках наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции. По этой причине электродвигатель постоянного тока в различных режимах работы (например, во время пуска и торможения) является как двигателем, так и генератором.

Для пуска электродвигателя постоянного тока щетки *4* подключают к источнику с напряжением U (рис. 1.3, *а*). При движении проводников в магнитном поле в них возникает ЭДС E индукции, направление которой противоположно ЭДС источника, в чем можно убедиться, применяя правило левой руки. По вто-рому закону Кирхгофа для якорной цепи запишем уравнение

$$U - E = IR, \tag{1.1}$$

где I – ток в обмотках якоря, А; R – полное сопротивление цепи якоря, состоящее из сопротивления всех обмоток якоря, обмоток дополнительных полюсов, компенсационных обмоток и соединительных проводов, Ом [10, 11].

ЭДС обмотки якоря можно найти в соответствии с уравнением Макс-велла [11]:

$$E = k\Phi\omega, \tag{1.2}$$

где $k = \dfrac{pN}{2\pi a}$ – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами электродвигателя; p – число пар полюсов; N – число активных (находящихся в области действия магнитного поля) проводников обмотки якоря; a – число параллельных ветвей обмотки якоря; Ф – магнитный поток, протекающий по магнитопроводу, Вб; ω – угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Подставив (1.2) в (1.1) и решив полученное выражение относительно угловой скорости ω, получим уравнение электромеханической характеристики двигателя постоянного тока

$$\omega(I) = \frac{2\pi a}{pN\Phi}(U - IR). \qquad (1.3)$$

Электромагнитный момент двигателя можно определить исходя из уравнения Фарадея [10, 11]:

$$M = k\Phi I = \frac{pN\Phi}{2\pi a} I. \qquad (1.4)$$

Из уравнений (1.3) и (1.4) можно сделать несколько важных выводов об основных параметрах работы электродвигателя постоянного тока: круговой частоте вращения ω и моменте на валу *M*. Обратим внимание на все параметры, кроме

электрических I и U, о которых речь пойдет далее. Как и в любой другой механи-ческой системе конструктивные параметры, отвечающие за изменение момента и частоты вращения, взаимосвязаны. Так, при увеличении числа пар полюсов p, числа проводников N и магнитного потока Ф возрастает момент M и в такое же число раз убывает частота вращения ω. При увеличении числа параллельных вет-вей a момент убывает, а частота вращения возрастает. Знание этих закономерно-стей при проектировании электродвигателей позволяет сконструировать машину с требуемыми механическими параметрами без использования редукторов. Кроме увеличения числа N проводников в обмотках якоря для повышения момента M целесообразно увеличивать магнитный поток Ф путем увеличения тока в обмот-ках возбуждения.

Выразив из (1.4) ток I и подставив его в (1.3), получим уравнение механиче-ской характеристики двигателя постоянного тока

$$\omega(M) = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2}. \qquad (1.5)$$

Уравнение (1.5) является линейным, поэтому график теоретической меха-нической характеристики электродвигателя представляет собой прямую (линия 3 на рис. 1.2, *б*). Реальная механическая характеристика электродвигателя постоян-ного тока может иметь нелинейный характер из-за реакции якоря. Этот эффект проявляется при токах якоря, на 50…70% превышающих номинальное значение, и заключается в уменьшении магнитного потока Ф. Уменьшение магнитного потока в соответствии с (1.5) приводит к увеличению частоты вращения. Поэтому при больших нагрузках в некоторых двигателях возможно увеличение скорости враще-ния. Двигатели с такими характеристиками неустойчивы, поэтому для стабильной работы в них устанавливают дополнительную стабилизирующую обмотку [10, 11].

Естественной механической характеристикой двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости ω от момента M, полученную при номи-нальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмо-ток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двига-теля. Все остальные характеристики называют искусственными. Искусственные характеристики получают при регулировании скорости вращения.

Рассмотрим особенности работы электродвигателя постоянного тока в различных режимах. Электродвигатель сравнительно небольшой мощности можно запустить подачей на его вход номинального напряжения. В момент включения частота вращения ω равна нулю. В соответствии с (1.2) ЭДС E также равна нулю, следовательно, ток I ограничивается только сопротивлением R (см. (1.1)). Этот ток может быть очень большим, так как сопротивление R обмоток якоря мало. По этой причине двигатели большой мощности пускают в ход с помощью специаль-ных пусковых устройств [9 – 11].

Большой пусковой ток I в соответствии с (1.4) создает большой момент M, под действием которого ротор двигателя быстро разгоняется. Увеличение скорости вращения приводит к увеличению ЭДС E (см. (1.2)) и уменьшению тока I (см. (1.1)). С ростом угловой скорости ω угловое ускорение постоянно уменьшается, так как уменьшается движущая сила процесса – разность $U - E$. В установившем-ся режиме работы двигатель без нагрузки почти не потребляет энергии, так как $U - E \rightarrow 0$. Энергия расходуется только на преодоление сил сопротивления: механических и аэродинамических. Максимальная частота вращения двигателя может быть определена по формуле (1.3), если ток I принять равным нулю.

Если разогнанный двигатель нагрузить, например, путем приведения в соприкосновение с обрабатываемой деталью рабочего инструмента станка, то скорость вращения уменьшится, что в соответствии (1.2) и (1.1) приведет к увеличению тока I, который в свою очередь, в соответствии с (1.4) повысит вращающий момент до необходимого уровня. Уравнение (1.4) устанавливает связь между моментом M и током потребления I и является следствием закона сохранения энергии. Механическая мощность $M \cdot \omega$ приближенно равна мощности $U \cdot I$, потребляемой от электрической сети.

1.1 ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙПОСТОЯННОГО ТОКА

При разработке систем управления электрическим приводом, эксплуатируемым в динамическом режиме при непрерывном изменении угловой скорости и направления вращения, важно знать динамические характеристики электродвига-

теля: переходные характеристики, передаточную функцию и частотные характеристики. Эти характеристики необходимы для синтеза автоматических систем управления приводом с заданным запасом устойчивости [1, 2, 5, 8, 9].

Механическая часть электропривода описывается уравнением [1.8]

$$M - M_R = J\frac{d\omega}{dt}, \tag{1.6}$$

где M и M_R – вращающий момент и момент сопротивления на валу двигателя, Н·м; J – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м^2; $d\omega/dt$ – угловое ускорение, рад/с^2.

Подставляя (1.2) в (1.1), а (1.1) в (1.4), получим

$$M = k\Phi\frac{U - k\Phi\omega}{R} = k\Phi\frac{U}{R} - \frac{k^2\Phi^2\omega}{R},$$

откуда с учетом (1.6) имеем

$$J\frac{d\omega}{dt} + \frac{k^2\Phi^2}{R}\omega = k\Phi\frac{U}{R} - M_R$$

или

$$\frac{JR}{k^2\Phi^2}\frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{U_R}{k\Phi}, \tag{1.7}$$

где $U_R = k\Phi I_R R$ и I_R – напряжение и ток, определяемые моментом сопротивления, В и А, соответственно.

Уравнение (1.7) представляет собой дифференциальное уравнение апериодического звена первого порядка с передаточной функцией по каналу напряжение–частота вращения [1, 2]

——— $T =$ $k^2\Phi^2$

где JR

$$W(s) = \frac{A}{Ts+1}, \qquad (1.8)$$

$A = \frac{1}{k\Phi}$.

Уравнения (1.7) и (1.8) позволяют получить все остальные динамические характеристики электродвигателя постоянного тока. Для получения уравнений движения в форме Коши обычно используют две фазовые координаты: $\varphi_1 = \varphi$ – угол поворота вала электродвигателя и $\varphi_2 = d\varphi/dt = \omega$ [1, 2].

1.2 ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока обладают следующими преимуществами [6]:

– возможностью плавного регулирования частоты вращения;

– хорошими пусковыми качествами;

– устойчивостью;

– разнообразием механических характеристик и возможностью их изменения;

– при питании от сети переменного тока максимальная частота не ограничивается частотой сети.

Хорошие пусковые качества электродвигателей обусловлены максимальным вращающим моментом при минимальной частоте вращения. Часто максимальный момент необходим при пуске электродвигателя. Это обусловлено необходимостью преодоления момента инерции. В машинах переменного тока пусковой момент меньше максимального, что затрудняет их запуск и приводит к необходимости использования электродвигателей большей номинальной мощности, чем необходимая. Частота вращения машин переменного тока определяется частотой напряжения питания. Максимальная частота вращения равна частоте сети. Для сети с частотой 50 Гц максимальная частота вращения синхронного или асинхронного электродвигателя составляет 3000 об/мин. Машины постоянного тока могут быть изготовлены для работы с частотой вращения до 30 000 об/мин.

Благодаря преимуществам электродвигателей постоянного тока их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте. Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового и самолетного электрооборудования.

Общим недостатком электрических машин постоянного тока является сложность их конструкции, связанная со щеточно-коллекторным механизмом,

осуществляющим постоянную коммутацию цепей электрической машины, из-за которой возникает искрение. Это снижает надежность машин и ограничивает область их применения взрывобезопасными процессами. Про методы улучшения коммутации можно прочитать в работах [10, 11].

Актуальной задачей является разработка электродвигателей со свойствами двигателей постоянного тока без коллекторно-щеточного узла. В настоящее время эта задача решена в вентильных электродвигателях, где переключение об-моток осуществляется полупроводниковыми элементами (транзисторами или тиристорами).

1.3ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В электродвигателях постоянного тока малой мощности (до нескольких сотен ватт) для формирования постоянного магнитного поля обычно применяют постоянные магниты. Это позволяет упростить конструкцию, подключение и управление электродвигателем, поскольку не требуется наматывать, подключать и подавать напряжение на обмотку возбуждения.

В электрических машинах средней и большой мощности постоянные магниты применять нецелесообразно, так как это приводит к увеличению их массы, габаритов и стоимости. Постоянные магниты намагничиваются до использования электрической машины, поэтому магнитный поток формируется за счет остаточной индукции материалов, из которых они изготовлены. Магнитный материал (электротехническую сталь) индуктора с обмоткой возбуждения можно использовать в насыщении при максимальной магнитной индукции. Остаточная индукция ферритов – магнитотвердых материалов, наиболее часто применяемых в электродвигателях, – составляет 0,2…0,4 Тл, максимальная индукция электротехнической стали может достигать 2 Тл. Эти цифры показывают, что для достижения одного и того же магнитного потока требуется постоянный магнит гораздо большего размера, чем электротехническая сталь для электромагнита [6]. Применение магнитотвердых материалов с лучшими магнитными свойствами, например, ЮНДК («Альнико»), удорожает конструкцию и ухудшает эксплуатационные качества электродвигателя, так как эти материалы легче размагничиваются.

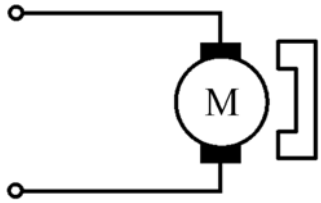


Рис. 1.9. Обозначение электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом на принципиальных электрических схемах

Обозначение электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом на принципиальных электрических схемах показано на рис. 1.9.

1.4ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С ОБМОТКАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

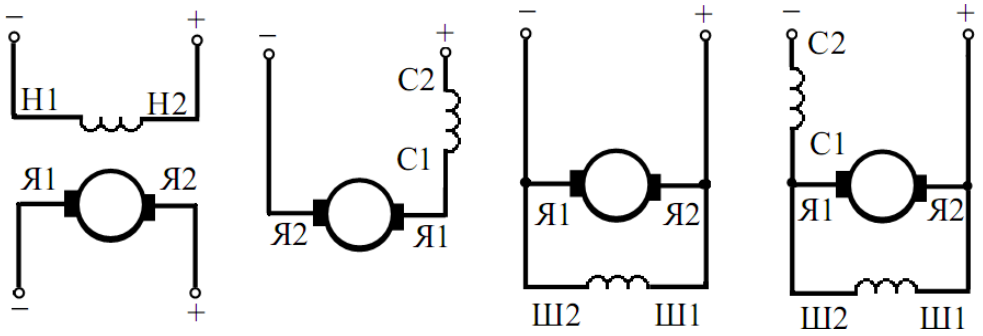
По способу соединения обмоток возбуждения и якоря выделяют электродвигатели постоянного тока:

- с независимым возбуждением (рис. 1.10, *а*);
- с последовательным возбуждением (рис. 1.10, *б*);
- с параллельным возбуждением (рис. 1.10, *в*);
- со смешанным возбуждением (рис. 1.10, *г*).

У электродвигателя с независимым возбуждением обмотка возбуждения (Н1 – Н2) и обмотка якоря (Я1 – Я2) питаются от разных источников. Это, как правило, двигатели большой мощности.

Все формулы, замечания и выводы, приведенные в пп. 1.1.3, 1.1.4, касаются непосредственно двигателя с независимым возбуждением, так как не приводилось никаких указаний относительно связи магнитного потока Ф, создаваемого обмоткой возбуждения, и напряжения U на обмотках якоря. Все остальные типы двигателей отличаются от двигателя с независимым возбуждением характером взаимосвязи величин Ф и U.

У электродвигателей с последовательным возбуждением обмотка возбуждения (С1 – С2) называется сериесной (рис. 1.10, *б*). Ток нагрузки двигателя является и током возбуждения (рис. 2.8, *а*). По этой причине магнитный поток Ф в двигателях последовательного возбуждения зависит от нагрузки.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 1.10. Схемы соединения обмоток возбуждения с якорем

В момент пуска двигателя и при работе в условиях большой нагрузки ток *I* потребления двигателя возрастает, что приводит к увеличению магнитного потока Ф и усилению момента *M* (см. п. 1.1.3). При уменьшении нагрузки ток потребления падает, магнитный поток уменьшается, что вызывает существенное увеличение частоты вращения. Электродвигатель с последовательным возбуждением имеет мягкую механическую характеристику (кривая *4* на рис. 1.2, *б*).

В случае минимальной нагрузки на валу электродвигателя с последовательным возбуждением частота вращения возрастает неограниченно (см. рис. 1.2, *б*) – двигатель идет «вразнос». По этой причине не допускается работа таких двигателей под нагрузкой, составляющей менее 25% от номинальной, а тем более в режиме холостого хода. Чтобы исключить возникновение режима холостого хода, в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применение ременных передач и фрикционных муфт для передачи движения на рабо-чий механизм [9].

У двигателей последовательного возбуждения при изменениях момента нагрузки потребляемая мощность и ток якоря изменяются в меньших пределах, чем у двигателей независимого и параллельного возбуждения. Например, в двигателе последовательного возбуждения при увеличении момента нагрузки в четыре раза потребляемая мощность возрастает лишь в два раза, а в двигателях независимого и параллельного возбуждения – в четыре раза. Объясняется это тем, что при последовательном возбуждении увеличение нагрузки двигателя сопровождается одновременным ростом как тока якоря, так и магнитного потока возбуждения, и оба

этих параметра способствуют увеличению вращающего момента. Это свойство двигателей последовательного возбуждения определяет области их применения – привод механизмов с тяжелыми условиями пуска и работы: частые пуски, реверсы, перегрузки. Обычно двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяют для привода подъемных устройств и транспортных средств в качестве тяговых двигателей (трамваи, метро, электровозы) [9].

Обмотка возбуждения (Ш1 – Ш2) двигателей параллельного возбуждения называется шунтовой (рис. 1.10, *в*). Шунтовая обмотка подключается параллельно якорю электродвигателя, поэтому ток возбуждения не зависит от нагрузки двигателя. Механическая характеристика такого электродвигателя является жесткой (кривая *3* на рис. 1.2, *б*) и совпадает по характеру с характеристикой электродвигателя с независимым возбуждением.

Часто в учебной литературе электродвигатели независимого и параллельного возбуждения рассматривают совместно. Однако следует иметь в виду, что при регулировании частоты вращения электродвигателя параллельного возбуждения путем изменения напряжения на якоре будет изменяться и ток возбуждения, что будет приводить к изменению механической характеристики. При малой нагрузке изменение частоты вращения будет затруднено. В случае электродвигателя независимого возбуждения такой эффект отсутствует.

В электродвигателях со смешанным возбуждением устанавливаются сериесная (С1 – С2) и шунтовая (Ш1 – Ш2) обмотки (рис. 1.10, *г*). Шунтовая обмотка может включаться не только параллельно, но и независимо. Характеристики двигателей смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения. При слабой последовательной обмотке они будут приближаться к характеристикам двигателя параллельного возбуждения, а при сильной – к характеристикам двигателя последовательного возбуждения. Благодаря наличию независимой обмотки возбуждения двигатели смешанного возбуждения могут работать в режиме холостого хода. Механическая характеристика электродвигателя со смешанным возбуждением представлена на рис. 1.2, *б* кривой *5*.

Обмотки возбуждения могут быть включены согласно или встречно. При согласном включении магнитные потоки обмоток направлены одинаково и складываются, при «встречном» – вычитаются. Встречное включение обмоток недопустимо, так как при нагрузке магнитное поле последовательной обмотки будет размагничивать магнитную систему двигателя, и его работа станет неустойчивой.

Применение двигателя смешанного возбуждения оправдано на транспорте. Параллельная обмотка позволяет эффективно применять рекуперативное торможение, при котором электрическая энергия возвращается в контактную сеть за счет обратимости электрических машин постоянного тока. В этом случае сущест-венно снижается суммарное энергопотребление, например, нескольких электро-поездов. Тормозящий состав частично обеспечивает энергией разгоняющийся.

1.5КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вращающий момент двигателя создается в результате взаимодействия тока, протекающего в обмотке якоря, с магнитным полем главных полюсов. При изменении направления тока якоря или полярности магнитного поля направление действия вращающего момента меняется на противоположное. В случае одновременного изменения направлений тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения вращающий момент будут действовать в прежнем направлении (см. рис.1.5). Поэтому, если двигатель постоянного тока подключить к сети переменного тока, то он будет работать, создавая переменный вращающий момент m, изменяющийся во времени по синусоидальному закону с двойной частотой по отношению к частоте сети и с некоторым постоянным средним значением M (рис. 1.11).

Момент инерции ротора сглаживает пульсации скорости вращения, вызванные пульсациями момента, и двигатель вращается с практически постоянной скоростью, развивая момент, равный среднему значению.

Величина среднего значения момента зависит от сдвига фаз между токами обмоток якоря I и возбуждения I_0. При нулевом сдвиге фаз вращающий момент будет всегда положительным с максимально возможным средним значением. Величина фазового сдвига зависит от многих факторов, но, при прочих равных ус-

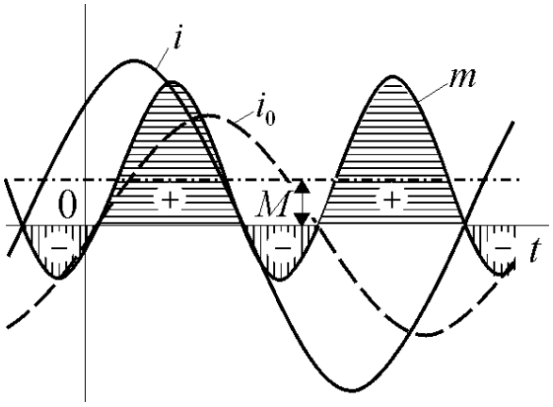


Рис. 1.11. Графики изменения мгновенных значений токов *i* и i_0 в обмотках якоря и возбуждения и момента *m* во время работы коллекторного электродвигателя на переменном токе

ловиях, у двигателей с параллельным возбуждением она существенно больше, чем у двигателей с последовательным возбуждением.

Характеристики и свойства коллекторных двигателей переменного тока аналогичны характеристикам двигателей постоянного тока. Благодаря хорошим механическим и регулировочным характеристикам маломощные двигатели находят широкое применение в промышленных и бытовых устройствах, где требуется получить высокие скорости вращения (до 30 000 об/мин) и возможность плавного регулирования скорости в большом диапазоне. Типичными примерами таких устройств являются двигатели бытового электроинструмента (дрели, лобзики, шлифовальные машины).

Коллекторные электродвигатели переменного тока конструктивно отличаются от машин постоянного тока. Основное отличие заключается в выполнении магнитопровода статора из набора пластин и обусловлено тем, что магнитный поток индуктора является переменным.

Коллекторные электродвигатели переменного тока конструктивно отличаются от машин постоянного тока. Основное отличие заключается в выполнении магнитопровода статора из набора пластин и обусловлено тем, что магнитный поток индуктора является переменным. Условия коммутации при работе на переменном токе хуже, чем на постоянном, поэтому самым ненадежным элементом конструкции таких электродвигателей является щеточный узел. Обычно он допускает многократную замену щеток.

Кроме коллекторных электродвигателей, рассчитанных только на переменное напряжение питания, выпускаются также *универсальные коллекторные электродвигатели*. Это электродвигатели малой мощности последовательного возбуждения с секционированной обмоткой возбуждения, благодаря чему они могут работать как на постоянном, так и на переменном стандартных напряжениях примерно с одинаковыми свойствами и характеристиками.

Отличительной особенностью таких двигателей является секционирование обмотки возбуждения. Для получения одинаковых механических характеристик на токе разного рода секционированную обмотку возбуждения на постоянном то-ке включают полностью, а на переменном – частично. Двигатель присоединяют к сети постоянного тока при помощи зажимов с обозначениями «+» и «–», а к сети переменного тока – с обозначениями «~». В зависимости от конструкции двигателя обмотка возбуждения может быть соединена с якорем внутри машины или может иметь самостоятельные наружные зажимы, что удобнее для изменения направления вращения якоря путем перемены мест проводов, подходящих к его зажимам или к зажимам обмотки возбуждения.

Статор универсальных электродвигателей также собирают из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали с выступающими полюсами. На них размещают по две секции обмотки возбуждения. Эти секции соединяют последовательно с якорем и располагают по обе стороны от его выводов, что снижает радиопомехи от искрообразования на коллекторе под щетками. Якорь универсальных двигателей устроен так же, как и якорь машин постоянного тока.

При работе электродвигателя от сети с номинальным напряжением и при номинальной нагрузке на валу скорость якоря при различном роде тока одинакова. Однако при перегрузке двигателя, присоединенного к сети переменного напряжения, скорость якоря уменьшается интенсивнее, чем при работе его от сети постоянного напряжения, т.е. механическая характеристика для переменного тока мягче.

Поскольку универсальные коллекторные электродвигатели имеют последовательное возбуждение, для них также, как и для обычных машин постоянного тока, характерно значительное увеличение частоты вращения при работе на холо-

стом ходу. Скорость якоря может превысить номинальную в 4 раза и выше, а это недопустимо из-за значительных центробежных сил, которые могут разрушить якорь. По этой причине режим холостого хода допустим только для двигателей малой номинальной мощности с относительно бóльшими механическими потеря-ми, ограничивающими скорость якоря. Двигатели с незначительными механиче-скими потерями всегда должны нести нагрузку не менее 25% номинальной.

Номинальный КПД коллекторных электродвигателей зависит от их номи-нальной мощности, быстроходности и рода тока. Так, у двигателей номинальной мощностью до 100 Вт КПД доходит до 0,55, мощностью до 600 Вт – до 0,70 и выше. Работа на переменном токе всегда сопровождается снижением КПД, что вызвано бóльшими магнитными и электрическими потерями. Номинальный ко-эффициент мощности этих двигателей составляет 0,70…0,90.

Более подробно ознакомиться с работой универсальных коллекторных элек-тродвигателей, их характеристиками, способами снижения акустического

шума и радиопомех можно в книге [12].