

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ.

1.1 МНОГООБОРОТНЫЕ.

1.1.1 ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В качестве исполнительных механизмов различного назначения преимущественно используются электродвигательный и электромагнитный приводы. В их основе лежат электрические двигатели и электромагниты, преобразующие электрическую энергию в линейное перемещение штока или вращение вала.

Структурная схема автоматизированного электропривода представлена на рис. 1. Электрическая энергия постоянного или переменного тока от источника ИЭ напряжением U преобразуется электрическим преобразователем ЭП к виду U' , необходимому для приведения выходного элемента электродвигателя или электромагнита ЭМ в движение. На выходе ЭМ формируется вектор \vec{x}' выходных фазовых координат, которыми могут быть линейное перемещение x' штока, угол φ' поворота вала, линейная и угловая скорости \dot{x}' и $\omega' = \omega \varphi'$, линейное или угловое ускорения \ddot{x}' и $\dot{\omega}' = \dot{\varphi}'$. Передаточное устройство ПУ преобразует эти параметры движения в требуемые параметры \vec{x} для совершения механической работы рабочим органом РО в выполняемом процессе.

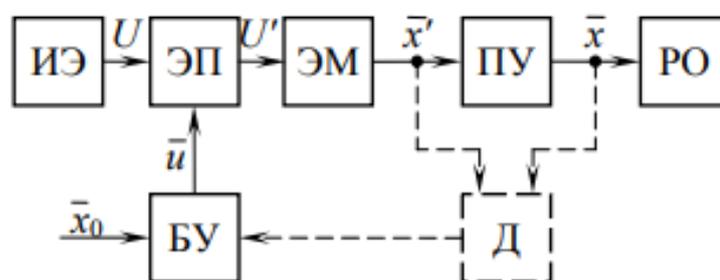


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированного электропривода

В зависимости от энергии, необходимой для совершения механического перемещения, на валу электродвигателя или на штоке электромагнита создается требуемый момент M или усилие F . В ряде случаев от этих параметров зависят сила тока I в обмотках электродвигателя и мощность P , потребляемая от источника ИЭ.

Требуемые параметры перемещения задаются с внешнего устройства в виде вектора \vec{x}_0 . Для контроля выполнения этого задания в электроприводе может быть применен датчик Д соответствующих фазовых координат, который может быть подключен как к выходу ЭМ, так и к выходу ПУ. Типичные датчики перемещения – энкодеры, рассмотрены в одном из разделов настоя-

щей главы. Блок управления БУ сравнивает получаемые в ходе движения параметры \bar{x} с заданными \bar{x}_0 и в зависимости от результата сравнения формирует вектор \bar{u} управляющих воздействий, которые посредством электрического преобразователя изменяют параметры движения \bar{x}' и \bar{x} . В отдельных случаях, например, при использовании шаговых электродвигателей, применения датчиков движения не требуется. Основой электропривода является электродвигатель. Электрические преобразователи, в качестве которых выступают коммутаторы, импульсные преобразователи, инверторы, рассматриваются применительно к конкретному типу электродвигателя. В настоящее время в промышленности существует тенденция минимизации количества передаточных устройств в приводах. Вместо электродвигателя с редуктором применяют двигатель с меньшей частотой вращения и большим моментом, вместо электродвигателя с преобразователем вращательного движения в поступательное – *линейный электродвигатель*.

Несмотря на широкое развитие новых типов электродвигателей, например, линейных, в настоящее время в электроприводах в большинстве случаев применяют электродвигатели вращательного движения. Такие двигатели состоят из подвижной и неподвижной частей.

Традиционно для машин переменного тока (асинхронных и синхронных электродвигателей) подвижная часть называется статором, а неподвижная – ротором.

Для машин постоянного тока неподвижная часть называется станиной (станиной с индуктором), а подвижная – якорем. Строго говоря, все эти части присутствуют как в машинах постоянного тока, так и в машинах переменного тока. Так, станина – это основная несущая часть машины, на которой монтируются постоянные магниты или магнитопроводы для обмоток статора, а также подшипниковые щиты, в которых закрепляются подшипники вала ротора. Обратимся к определениям, приведенным в ГОСТ 27471–87 [7]. *Статор вращающейся электрической машины* – часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой. *Ротор электрической машины* – вращающаяся часть электрической машины. *Якорь синхронной машины (коллекторной машины постоянного тока)* – часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, в которой индуктируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки. *Индуктор синхронной машины* – статор или ротор синхронной машины, на котором размещены постоянные магниты или обмотка возбуждения. Следовательно, понятия статор и ротор применимы ко всем вращающимся электрическим машинам, независимо от их типа, в том числе и к машинам постоянного тока с постоянными магнитами. Традиционно, якорем у синхронных машин являет-

ся статор, у машин постоянного тока – ротор. В асинхронном электродвигателе и статор, и ротор – якоря. Индуктором у машин постоянного тока является статор, у синхронных машин – ротор.

Основные технические характеристики электродвигателей определяются параметрами входных электрических воздействий и выходного механического движения. К электрическим параметрам относятся: род тока, номинальное напряжение питания U_0 , частота f переменного тока, коэффициентом мощности $\cos\varphi$, номинальная потребляемая мощность P . С этими величинами связаны сопротивление R обмоток и номинальный ток потребления I . Параметрами выходного вращательного движения являются номинальная частота вращения n (число оборотов в минуту или секунду) или угловая скорость $\omega = 2\pi n$, номинальный момент на валу M_0 и коэффициент полезного действия η . Для большинства электродвигателей выходные механические параметры взаимозависимы. Частота вращения ω зависит от нагрузки на валу (момент M).

Основной характеристикой, позволяющей судить о работе двигателя при различных нагрузках, является механическая характеристика. *Механическая характеристика электродвигателя* – это зависимость угловой скорости вращения ω от момента M на валу. Часто вместо угловой скорости ω используют внесистемную физическую величину – частоту вращения n . Степень изменения скорости с изменением момента у различных типов электрических машин неодинакова и различается в зависимости от жесткости механических характеристик (см. рис. 2) [8].

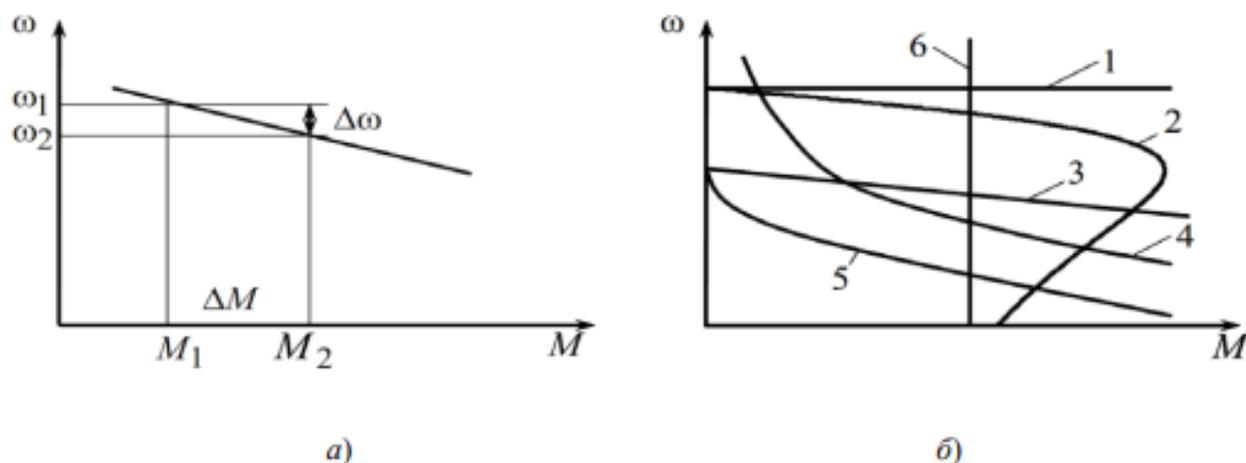


Рисунок 2 – Механические характеристики электродвигателей: а – к расчету жесткости характеристики; б – механические характеристики различных электродвигателей

Жесткостью механической характеристики называется отношение приращения момента M к приращению угловой скорости ω :

$$\beta = \Delta M / \Delta \omega,$$

где $\Delta M = M_2 - M_1$,

$$\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1;$$

M_1 и M_2 – моменты, соответствующие угловым скоростям ω_1 и ω_2 (см. рис. 2, а).

Для нелинейной механической характеристики ее жесткость зависит от момента M и угловой скорости ω .

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основных типа в зависимости от их жесткости (рис 2, б) [8].

При *абсолютно жесткой механической характеристике* скорость с изменением момента остается неизменной (прямая б рис. 2, б; $\beta \rightarrow \infty$). Такой характеристикой обладают синхронные электрические машины. В этих машинах скорость вращения вала полностью определяется частотой электрических сигналов на входе электродвигателя, которые позволяют точно определять угол поворота вала.

Жесткая механическая характеристика отличается незначительным изменением угловой скорости с изменением момента. Жесткой механической характеристикой обладают асинхронные электродвигатели в пределах ее рабочей части (кривая 2, рис. 2, б) и двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения (линия 3, рис. 2, б).

Мягкая механическая характеристика отличается значительным изменением угловой скорости с изменением момента. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (кривая 4, рис. 2, б) и двигатели постоянного тока смешанного возбуждения (кривая 5, рис. 2, б).

В случае *абсолютно мягкой механической характеристики* момент двигателя остается неизменным с изменением угловой скорости (прямая б, $\beta = 0$; рис. 2, б). Абсолютно мягкой механической характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока.

Механическая характеристика является основой для выбора типа электродвигателя при проектировании электропривода. Кроме механической характеристики электродвигателя важную роль для экономичной эксплуатации электропривода играют механические характеристики приводимых в движение механизмов. Эти характеристики также рассматриваются в [8, 9].

Кроме механических характеристик электродвигателей используют [9]:

- регулировочные характеристики – зависимость частоты вращения двигателя от какого-либо влияющего параметра (напряжения питания, величины тока в обмотке возбуждения, частоты переменного тока и т.д.);

- энергетические характеристики, устанавливающие связь между частотой вращения и каким-либо энергетическим показателем двигателя (коэффициентом полезного действия, коэффициентом мощности и т.п.)

1.1.1.1 ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В системах автоматики и телемеханики находят широкое применение исполнительные двигатели постоянного тока. Это связано с тем, что двигатели постоянного тока позволяют просто, плавно и экономично регулировать скорость вращения в очень широком диапазоне. При этом они устойчиво работают при любых скоростях вращения и любом характере нагрузки. По массе и габаритам они в два-три раза меньше асинхронных двигателей. К исполнительным двигателям предъявляется ряд особых требований, обусловленных спецификой их работы. Эти двигатели практически никогда не работают в номинальном режиме. Для их работы характерны частые пуски, остановки, реверсы. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых они почти постоянно находятся, исполнительные двигатели обычно выполняют малоинерционными. Очень важным требованием к исполнительным двигателям является отсутствие самохода – самоторможение двигателя при снятии сигнала управления. Механические характеристики исполнительных двигателей должны быть линейными, пусковой момент – максимальным [9].

Основным недостатком двигателей постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие коллектора и щеток. Из-за искрения коллекторные двигатели нормального исполнения не могут работать во взрывоопасных средах и требуют установки устройств подавления радиопомех, возникающих при их работе. В качестве исполнительных двигателей постоянного тока применяют двигатели с независимым электромагнитным возбуждением или с возбуждением постоянными магнитами. По конструкции исполнительные двигатели делятся на двигатели обычного исполнения, двигатели с беспазовым якорем и малоинерционные двигатели. Двигатели обычного исполнения отличаются от силовых двигателей постоянного тока только тем, что имеют шихтованный магнитопровод статора. Это связано с необходимостью минимизации потерь в стали, так как эти двигатели значительную часть времени работают в переходных режимах с изменяющимся основным магнитным потоком. Двигатели с беспазовым якорем отличаются от обычных двигателей тем, что обмотка якоря располагается на цилиндрической поверхности якоря. Это увеличивает воздушный зазор двигателя и требует увеличения тока возбуждения, но позволяет существенно снизить

индуктивность обмотки якоря и за счет этого улучшить условия коммутации. Кроме того, беспазовая конструкция позволяет уменьшить момент инерции якоря и увеличить быстродействие двигателя. Одним из недостатков двигателей постоянного тока обычного исполнения является относительно большой момент инерции якоря, снижающий их быстродействие. Для уменьшения момента инерции якоря применяются различные конструктивные решения, одним из которых является использование обмотки якоря, изготовленной печатным способом на немагнитном диске или цилиндре. Обмотку якоря малоинерционных двигателей выполняют также на немагнитных дисках или цилиндрах обычным проводом с последующей заливкой полимерным составом. В результате образуется монолитный цилиндр или диск с проводниками обмотки, расположенными внутри. Такая технология более сложная и трудоемкая, чем печатная, но позволяет увеличить механическую прочность конструкции якоря.

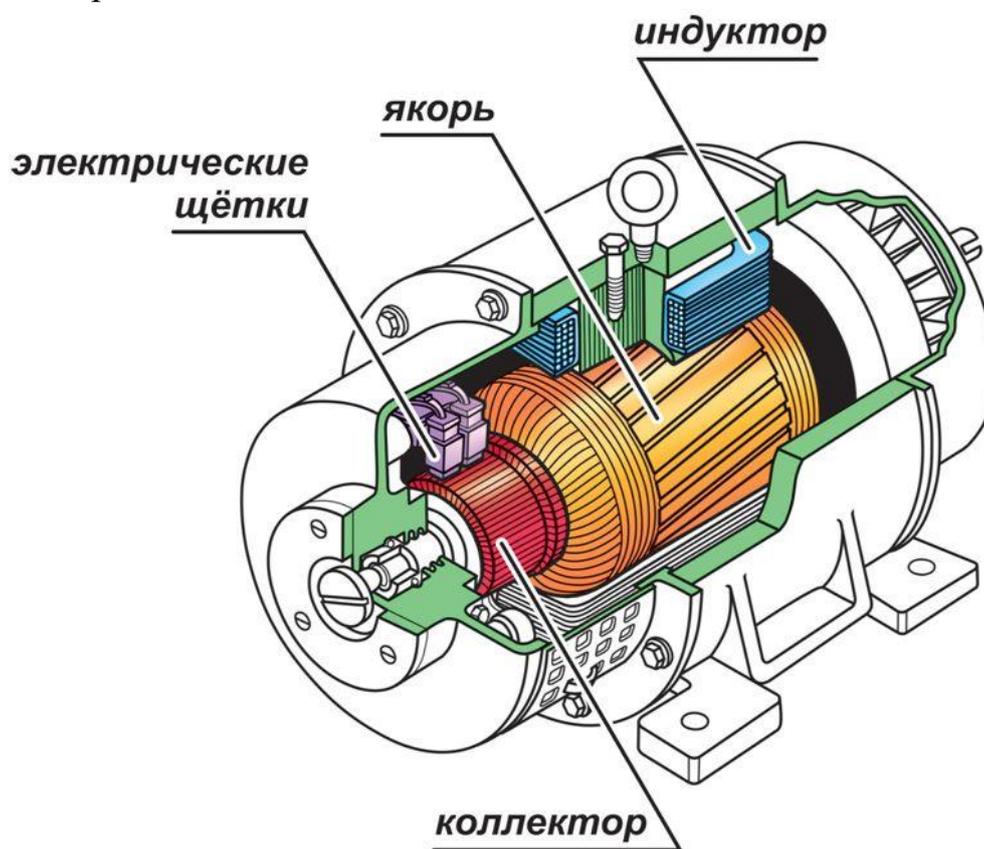


Рисунок 3 – Устройство машины постоянного тока

На рисунке 3 показано устройство машины постоянного тока, а на рисунке 4, а представлена упрощенная схема, поясняющая принцип работы электрических машин постоянного тока. Между полюсами постоянного магнита 1 расположен проводник, по которому через щетки 4 и пластины кол-

лктора 3 протекает ток I . При взаимодействии магнитного поля проводника с полем постоянного магнита возникает сила F , действующая на проводник.

Направление силы F можно определить по правилу левой руки. Силы F действует на верхнюю и нижнюю (по схеме) части проводника в противоположные стороны, в результате чего формируется момент пары сил M , поворачивающий проводник против часовой стрелки. После поворота на 180° верхняя и нижняя части проводника поменяются местами, но направления тока I , силы F и момента M сохранятся, так как одновременно с поворотом произойдет переключение в щеточно-коллекторном узле 3 – 4.

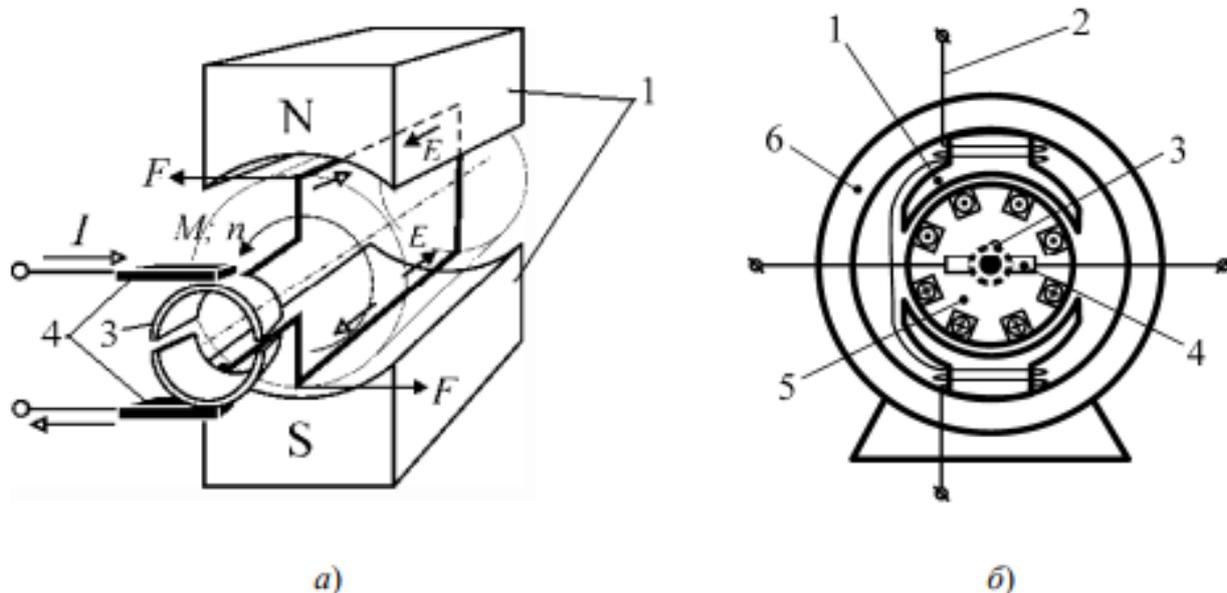


Рисунок 4 – Схемы электрических машин постоянного тока: а – к пояснению принципа работы; б – к пояснению устройства

Этот узел является одним из основных элементов машин постоянного тока и отличает их от других электрических машин. Он необходим для сохранения постоянного направления вращения.

Из рисунка 4, а видно, что при повороте проводника на 90° , на него не будет действовать момент M , так как плечо пары сил F будет равно нулю, а, кроме того, между щетками 4 произойдет короткое замыкание через пластины коллектора 3. Поэтому реальные электрические машины постоянного тока никогда не изготавливают с одной обмоткой и двумя пластинами коллектора. Минимальное число обмоток и пластин коллектора равно трем. Причем так изготавливают только дешевые малогабаритные электродвигатели для неответственных устройств. Обычно число коллекторных пластин не менее пяти даже у маломощных электродвигателей. На рисунке 4, б представлена упрощенная схема устройства электрической машины постоянного тока. В станине б установлены полюсы 1 индуктора, создающего постоянное магнитное поле за счет протекания тока возбуждения по обмоткам цепи 2.

Щетки 3 и коллектор 4 обеспечивают подвод электрической энергии к обмоткам якоря 5. Плоскость, проходящая через ось электродвигателя посредине между соседними полюсами, называется геометрической нейтралью. На рисунке 4 линии два полюса N и S , поэтому геометрическая нейтраль горизонтальна и на рис. 4, б совпадает с изображенными проводниками щеток 4.

Проводники якоря, находящиеся на геометрической нейтрали, как было указано выше, не участвуют в формировании вращающего момента M . По этой причине полюсы I не имеет смысла подводить близко к геометрической нейтрали, а щетки по ряду причин, наоборот, целесообразно располагать именно на ней. В каком бы положении ни находился якорь, схема соединения его обмоток с пластинами коллектора обеспечивает противоположное направление протекания токов по разные стороны от геометрической нейтрали. Станина, полюса индуктора и якорь представляют собой магнитную цепь. В электродвигателе с обмотками возбуждения все части магнитной цепи изготавливаются из магнитомягкого материала, в электродвигателе с постоянным магнитом ротор – из магнитомягкого, а статор – из магнитотвердого [6].

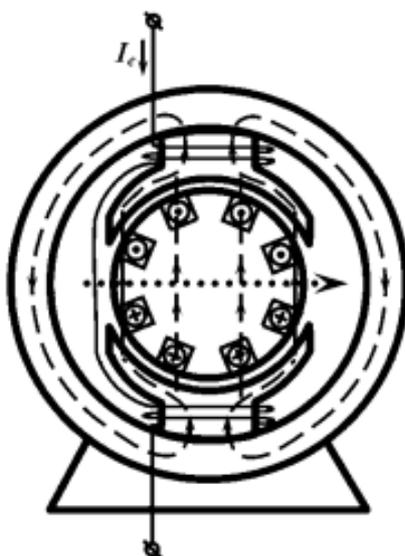


Рисунок 5 – Направления магнитных полей в электродвигателе постоянного тока

На рисунке 5 штриховыми линиями со стрелками показаны направления магнитного поля в различных частях электрической машины при протекании по обмоткам возбуждения тока I_e в направлении, указанном стрелкой. Все обмотки якоря соединены последовательно. Точками соединения являются пластины коллектора.

Ток проходит по всем обмоткам за исключением тех, концы которых подключены к пластинам коллектора, замыкаемым щетками.

Обмотки якоря создают в нем магнитное поле, направление которого показано на рис. 5 пунктирной линией со стрелкой. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора приводит к формированию вращающего момента, который стремится выровнять направления магнитных полей, т.е. на ротор действует момент, направленный против часовой стрелки. Схема такого взаимодействия представлена на рис. 6, а. Если изменить направление тока в обмотках возбуждения, то вектор индукции B_S магнитного поля статора изменит свое направление на противоположное (рис. 6, б).

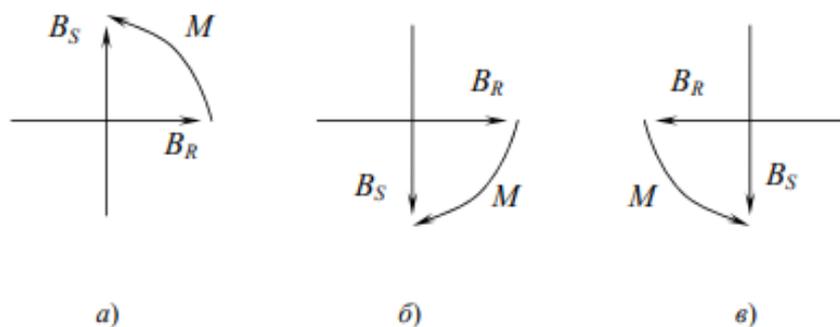


Рисунок 6 – Схема взаимодействия магнитных полей статора и ротора

На ротор будет действовать момент M , который также будет стремиться повернуть вектор индукции B_R магнитного поля ротора в сторону вектора B_S , но будет направлен по часовой стрелке. Если теперь путем изменения полярности подключения щеток изменить направление тока в обмотках ротора, то свое направление изменит и вектор индукции B_R , а момент M примет исходное направление против часовой стрелки (рис. 6, в). Таким образом, изменение направления тока в любой части электрической машины приводит к изменению направления вращения на противоположное. При работе электрической машины под нагрузкой магнитные поля статора и ротора складываются, и в области якоря и полюсных наконечников формируется сложное магнитное поле. Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле статора называется реакцией якоря и является негативным эффектом [10, 11].

1.1.1.2. УСТРОЙСТВО ЯКОРЯ

Якорь электрических машин постоянного тока является наиболее сложным узлом. Кроме коллектора он содержит ряд обмоток, которые укладываются в пазы магнитопровода, находящиеся под разными полюсами. Конструкции магнитопровода и коллектора якоря показаны на рис. 7.

В связи с тем, что в обмотках якорей машин постоянного тока из-за коммутации на коллекторе протекает импульсный ток, для уменьшения по-

теперь в стали необходимо набирать пакет из отдельных тонких пластин электротехнической стали.

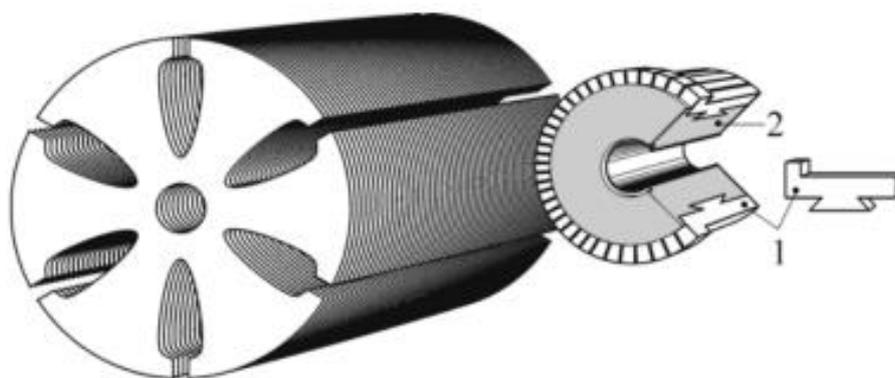


Рисунок 7 – Конструкции магнитопровода и коллектора якоря: 1 – пластина медная; 2 – втулка пластмассовая

Коллектор состоит из набора изолированных друг от друга медных пластин 1, залитых в пластмассовую втулку 2 (рис. 7). Пакет ротора и коллектор напрессовываются на вал якоря, и в открытые пазы пакета укладывается обмотка, концы секций которой припаиваются к пластинам коллектора.

Количество пазов может совпадать с количеством пластин якоря и может быть в несколько раз меньше. Если количества пазов и пластин совпадают, то число обмоток в пазу $u = 1$, если количество пазов в два раза меньше числа пластин, то $u = 2$. Обмотка якоря состоит из секций. Секция представляет собой наименьшую часть обмотки, заключенную между двумя присоединениями к коллектору. Секция может состоять из одного или нескольких витков. Для понимания взаимного геометрического расположения обмоток и пластин коллектора на рис. 8 представлены схемы намотки якоря различными способами, а на рис. 9 – соответствующие рабочие схемы этих намоток. На схемах рис. 8, а и б позициями 1 обозначено начало намотки, 2 – первая секция. После намотки секции делается отвод 4 на пластину коллектора, а затем наматывается следующая секция 3, после чего вновь делается отвод 5.

После завершения намотки якоря по схеме рис. 8, а в каждом пазу будет лежать по одной стороне от двух различных секций (всего две стороны), а по схеме рис. 8, б – по одной стороне от четырех различных секций (всего четыре стороны).

На схеме рис. 8, в позициями 1 обозначено начало намотки, 2 – первая полусекция, 3 – переход к второй полусекции, 4 – вторая полусекция, 5 – отвод для присоединения к пластине коллектора, после которого наматывается следующая секция.

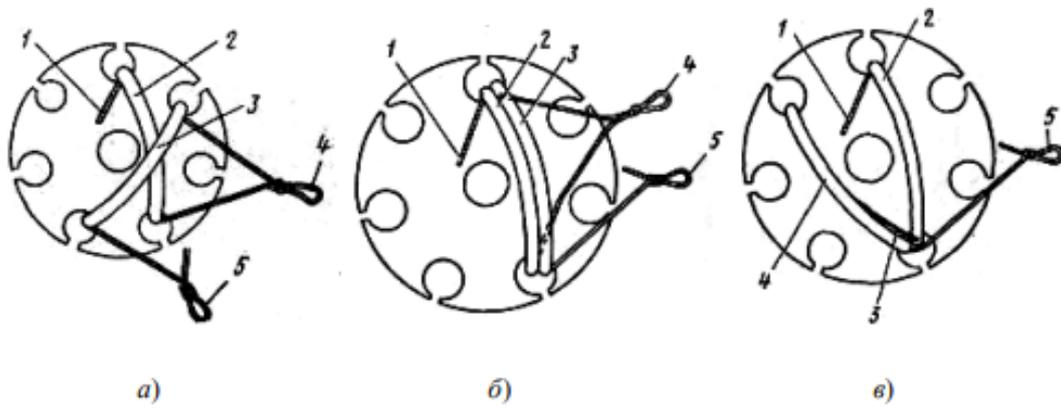


Рисунок 8 – Схемы расположения обмоток якоря на магнитопроводе при различных способах намотки: а – «простая» при $u = 1$; б – «простая» при $u = 2$; в – «в елочку»

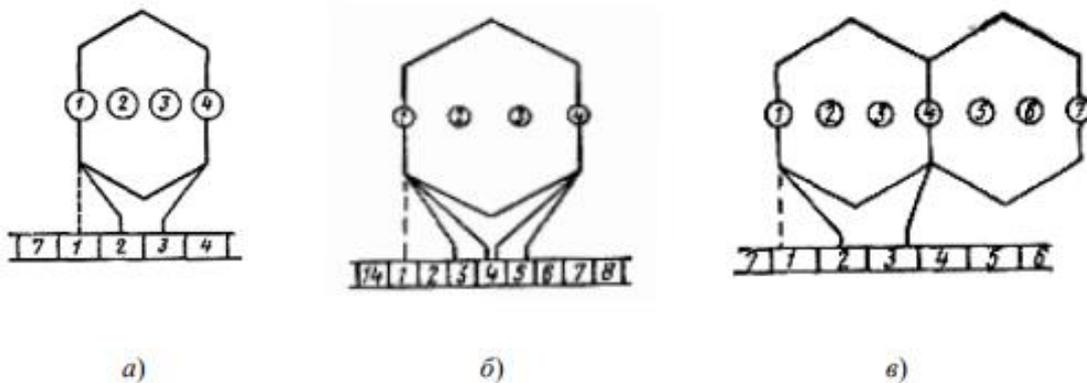


Рисунок 9 – Рабочие схемы обмоток якоря при различных способах намотки: а – «простая» при $u = 1$; б – «простая» при $u = 2$; в – «в елочку»

Рабочими схемами (рис. 9) пользуются при намотке якорей. Независимо от числа витков в секции показывают только один виток. Номерами в кружках обозначаются пазы магнитопровода, в прямоугольниках – пластины коллектора. На рисунках 4 и 5 изображены схемы электродвигателя с одной парой полюсов $N-S$. Электрические машины постоянного тока изготавливают и с большим числом пар полюсов. При намотке их якорей различают петлевые и волновые обмотки.

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

- с независимым возбуждением (рис. 10, а);
- с последовательным возбуждением (рис. 10, б);
- с параллельным возбуждением (рис. 10, в);
- со смешанным возбуждением (рис. 10, г).

У электродвигателя с независимым возбуждением обмотка возбуждения ($H1 - H2$) и обмотка якоря ($Я1 - Я2$) питаются от разных источников.

Это, как правило, двигатели большой мощности. Все формулы, замечания и выводы, приведенные ниже, касаются непосредственно двигателя с независимым возбуждением, так как не приводилось никаких указаний относительно связи магнитного потока Φ , создаваемого обмоткой возбуждения, и напряжения U на обмотках якоря. Все остальные типы двигателей отличаются от двигателя с независимым возбуждением характером взаимосвязи величин Φ и U . У электродвигателей с последовательным возбуждением обмотка возбуждения (С1 – С2) называется *серийной* (рис. 10, б). Ток нагрузки двигателя является и током возбуждения. По этой причине магнитный поток Φ в двигателях последовательного возбуждения зависит от нагрузки.

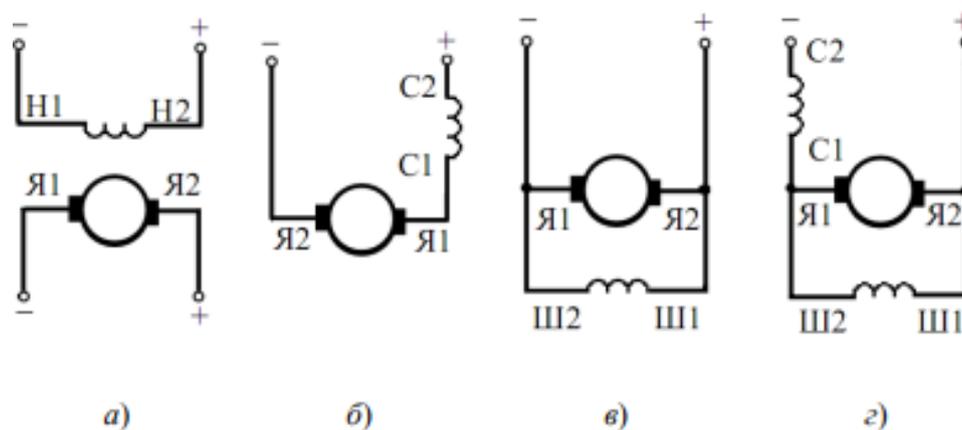


Рисунок 10 – Схемы соединения обмоток возбуждения с якорем

В момент пуска двигателя и при работе в условиях большой нагрузки ток I потребления двигателя возрастает, что приводит к увеличению магнитного потока Φ и усилению момента M . 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. 2, б). В случае минимальной нагрузки на валу электродвигателя с последовательным возбуждением частота вращения возрастает неограниченно (см. рис. 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 рабочий 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 воз-

буждения 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. 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. 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 серийная (С1 – С2) и шунтовая (Ш1 – Ш2) обмотки (рис. 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. 2, б кривой 5.

Обмотки возбуждения могут быть включены согласно или встречно. При согласном включении магнитные потоки обмоток направлены одинаково-

во 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 существенно снижается суммарное энергопотребление, например, нескольких электропоездов. Тормозящий состав частично обеспечивает энергией разгоняющийся.

Таким образом 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. Акту-

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

1.1.1.3. 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. 4, 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 второму закону Кирхгофа для якорной цепи запишем уравнение:

$$U - E = IR, \quad (1.1)$$

где I – ток в обмотках якоря, A ;

R – полное сопротивление цепи якоря, состоящее из сопротивления всех обмоток якоря, обмоток дополнительных полюсов, компенсационных обмоток и соединительных проводов, Om [10, 11].

ЭДС обмотки якоря можно найти в соответствии с уравнением Максвелла [11]:

$$E = k\Phi\omega, \quad (1.2)$$

где $k = \frac{pN}{2\pi a}$ – 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;

Φ – магнитный поток, протекающий по магнитопроводу, $Bб$;

ω – угловая скорость вращения вала двигателя, rad/c . Подставив (1.2) в (1.1) и решив полученное выражение относительно угловой скорости ω , получим уравнение электромеханической характеристики двигателя постоянного тока)

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

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

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

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 механической системе конструктивные параметры, отвечающие за изменение момента и частоты вращения, взаимосвязаны. Так, при увеличении числа пар полюсов p , числа проводников N и магнитного потока Φ возрастает момент M и в такое же число раз убывает частота вращения ω . При увеличении числа параллельных ветвей a момент убывает, а частота вращения возрастает. Знание этих закономерностей 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 Φ путем увеличения тока в обмотках возбуждения. Выразив из (1.4) ток I и подставив его в (1.3), получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока

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

Уравнение (1.5) является линейным, поэтому график теоретической механической характеристики электродвигателя представляет собой прямую (линия 3 на рис. 3, б). Реальная механическая характеристика электродвигателя постоянного 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 Φ .

Уменьшение магнитного потока в соответствии с (1.5) приводит к увеличению частоты вращения. Поэтому при больших нагрузках в некоторых двигателях возможно увеличение скорости вращения. 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 номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. 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 специальных 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 установившемся 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.

1.1.1.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При разработке систем управления электрическим приводом, эксплуатируемым в динамическом режиме при непрерывном изменении угловой скорости и направления вращения, важно знать динамические характеристики электродвигателя: 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].

$$M - M_R = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.6)$$

где M и M_R – вращающий момент и момент сопротивления на валу двигателя, Н·м;

J – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м²;
 $d\omega/dt$ – угловое ускорение, рад/с².

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

$$\frac{JR}{k^2\Phi^2} + \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{UR}{k\Phi}, \quad (1.7)$$

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 аperiodического звена первого порядка с передаточной функцией по каналу напряжение–частота вращения [1, 2].

$$W(S) = \frac{A}{T_S + 1}, \quad (1.8)$$

где $T = \frac{JR}{k^2\Phi^2}$, $A = \frac{1}{k\Phi}$.

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].

1.1.1.5 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (ВЕНТИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ)

Недостатки коллекторных двигателей постоянного тока, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла (недостаточная надежность, высокая стоимость изготовления и эксплуатации, недопустимость работы в пожаро- и взрывоопасных средах), привели к необходимости создания двигателя постоянного тока без коллектора и щеток. Эти элементы в машине постоянного тока выполняют функцию механического переключателя (коммутатора). Благодаря широкому применению управляемых полупроводниковых

приборов – тиристоров и транзисторов, появилась возможность создать на этих элементах полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно-коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти полупроводниковые приборы работают в ключевом режиме [9]. Вентильный электродвигатель, возможно, было бы максимально приблизить по свойствам и принципу работы к электродвигателю постоянного тока, однако в ходе развития такого типа электроприводов более рациональным оказалось соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором [9, 10]. При любой реализации вентильного электропривода обмотка якоря вместе с полупроводниковым коммутатором располагается на статоре машины, а индуктором является ротор. При этом на роторе размещаются полюсы, возбуждаемые постоянными магнитами или обмоткой возбуждения через контактные кольца. В первом случае двигатель полностью лишен скользящих электрических контактов (бесконтактный двигатель) [10]. Кольца, так же, как и коллектор, соприкасаются со щетками, однако в них отсутствует коммутация, в результате чего они являются узлом, менее сложным в изготовлении и эксплуатации, чем коллектор. Свойства вентильного двигателя зависят от способа управления полупроводниковыми элементами коммутатора. Если его работа не зависит от пространственного положения ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного. Регулирование частоты вращения в таком двигателе выполняется изменением частоты питающего напряжения посредством статических преобразователей частоты. При этом переключение полупроводниковых элементов коммутатора не зависит от пространственного положения ротора двигателя и его частоты вращения. Такое управление называют частотным.

Однако задача создания вентильных двигателей – получить бесконтактный двигатель постоянного тока со свойствами коллекторного двигателя. Это оказывается возможным лишь при позиционном управлении, когда последовательность и частота переключения полупроводниковых элементов коммутатора находятся в строгой зависимости от пространственного (углового) положения ротора относительно статора двигателя. В этом случае процесс переключения тока в катушках обмотки статора (якоря) вентильного двигателя происходит аналогично процессу коммутации в коллекторном двигателе постоянного тока. Механические характеристики вентильных двигателей с позиционным управлением мало отличаются от механических характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения [9]. Отличие заключается во взаимном расположении магнитных полей статора и ротора. В электродвигателях постоянного тока магнитные поля взаимно перпендикулярны (см. рис. б), а в вентильных электроприводах

на основе синхронного двигателя угол между ними изменяется в зависимости от нагрузки. Кроме синхронных электродвигателей в вентильных электроприводах применяют индукторные шаговые электродвигатели.

Структурно вентильный электродвигатель относится к классу двигателей постоянного тока, но его конструкция отличается от классических ДПТ (рис. 11). В известной степени они похожи на шаговые двигатели, но принцип их работы иной, и по ряду параметров, особенно по скорости, они значительно превосходят двигатели этого типа. Роднит их наличие ротора в виде постоянных магнитов и использование электронной коммутации для управления статором.

В основе лежит инверсная конструкция.

Статор вентильного двигателя



Рисунок 11 – Вентильный двигатель с внешним ротором

Ротор. Узел выполнен из высококоэрцитивных магнитных материалов (ферриты, сплавы Nd-Fe-B), формирующих постоянное магнитное поле. Магниты могут крепиться как на поверхности якоря, так и внутри сердечника.

Статор. Содержит многофазные (чаще трёхфазные) распределённые или сосредоточенные обмотки, зафиксированные в пазах шихтованного магнитопровода из электротехнической стали. Число обмоток зависит от подключаемых фаз и периодичностью их чередования. Обмотки расположены под углом 120° . Материал – медь или алюминий с термостойкой изоляцией.

Датчики положения ротора. Обычно это датчики Холла (рис. 12), которые срабатывают при определенной величине изменения магнитного поля, отличаются большей точностью и меньшим запаздыванием.

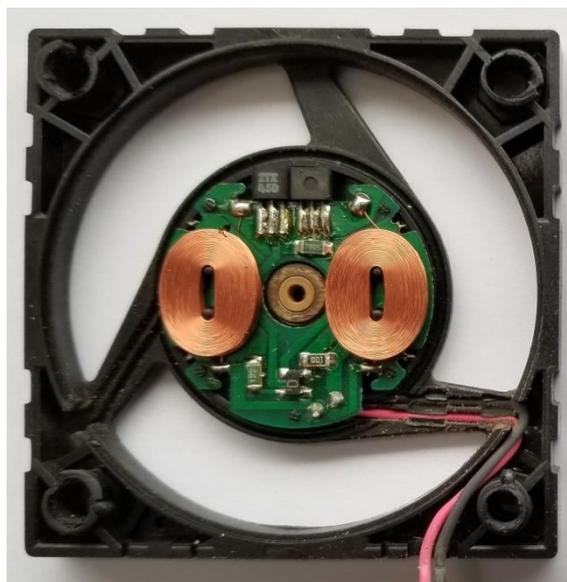


Рисунок 12 – Датчик положения ротора

Также могут применяться датчики трансформаторного или индуктивного типа, оптические энкодеры. Фиксируют угол поворота с точностью до $0,5^\circ$.

Микропроцессорный блок управления (MCU). Формирует сигналы коммутатора, меняет частоту, форму и амплитуду выходных импульсов в зависимости от состояния датчиков привода. Система управления включает также инвертор и драйверы.

Также в конструкцию входят диэлектрическая прослойка, втулка, изоляционное кольцо, обойма, монтажная плата, к которой подключен жгут электропроводки. Все эти компоненты заключены в корпус.

Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами (ДПТ ПМ или PMDC) – это компактные и эффективные машины, где классическая обмотка возбуждения заменена на постоянные магниты.

Современный тип, где магниты закреплены на роторе, а обмотки – на статоре. Управление осуществляется электронным контроллером, что исключает износ щеток.

Ключевые особенности:

- Высокий КПД. Отсутствие затрат энергии на создание магнитного поля (возбуждение) повышает эффективность до 80...90%.

- Компактность. Магниты позволяют уменьшить габариты при сохранении мощности.

- Линейность. Скорость вращения и крутящий момент легко регулируются изменением напряжения.

- Ограничения. Фиксированное магнитное поле не позволяет использовать метод «ослабления поля» для работы на сверхвысоких скоростях (без

сложной электроники). Стоимость выше из-за использования редкоземельных металлов (неодим, самарий-кобальт).

В настоящий момент разработаны бесколлекторные двигатели постоянного тока с обмоткой без стального сердечника и с внутренним ротором (рис. 13, а); бесколлекторные двигатели постоянного тока с обмоткой без стального сердечника и с внешним ротором (рис. 13, б) и бесколлекторные двигатели постоянного тока с обмоткой со стальным сердечником (рис. 14).

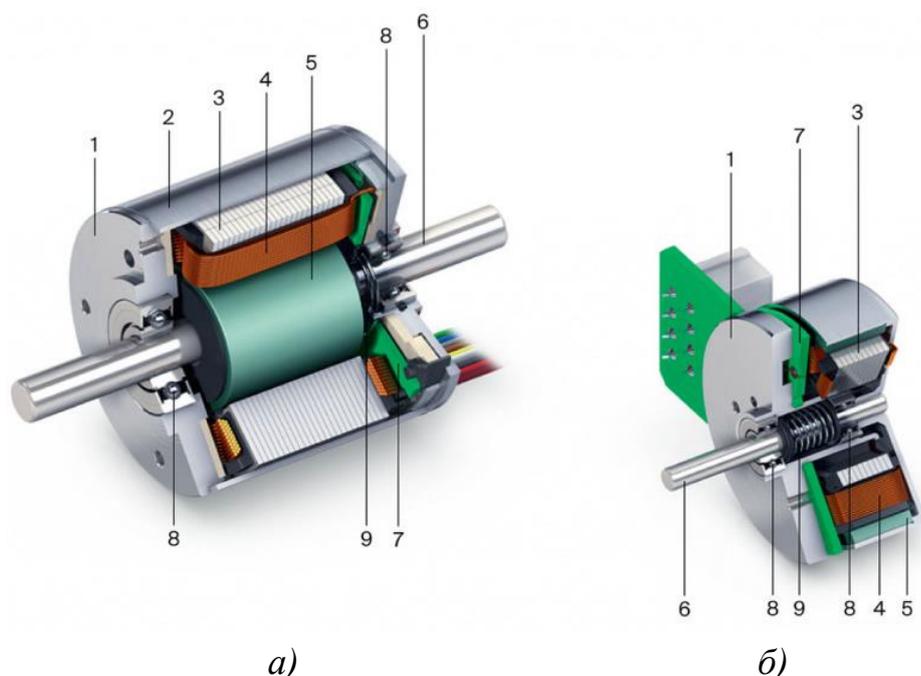


Рисунок 13 – Устройство бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами с обмоткой со стальным сердечником: а – внутренним ротором; б – с внешним ротором: 1 – фланец; 2 – корпус; 3 – пакет из ламинированного стального листа; 4 – обмотка; 5 – постоянный магнит; 6 – вал; 7 – плата с датчиками Холла; 8 – шарикоподшипник с предварительным поджатием; 9 – пружина предварительного поджатия

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.



Рисунок 14 – Устройство бесколлекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами с обмоткой без стального сердечника: 1 – фланец; 2 – корпус; 3 – пакет из ламинированного стального листа; 4 – обмотка; 5 – постоянный магнит; 6 – вал; 7 – плата с датчиками Холла; 8 – управляющий магнит; 9 – шарикоподшипник

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 $0,2...0,4 \text{ Тл}$, 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.

Обозначение электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом на принципиальных электрических схемах показано на рис. 15.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока отличаются превосходными характеристиками крутящего момента, высокой мощностью, чрезвычайно широким диапазоном скоростей и, благодаря отсутствию коллектора со щетками, исключительно длительным сроком службы.

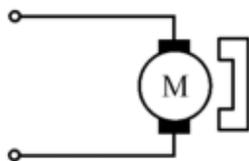


Рисунок 15 – Обозначение электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом на принципиальных электрических схемах

Еще одной характерной чертой бесколлекторных двигателей являются малые электромагнитные помехи (ЭМП). Они практически не создают радиопомех, что решает непростые проблемы электромагнитной совместимости и позволяет использовать их совместно с чувствительным к сторонним помехам оборудованием.

Конструкция бесколлекторного двигателя позволяет эксплуатировать его в воде и агрессивных средах, а возможность стерилизации открывает путь к использованию в медицинской промышленности.

Особенностью бесколлекторных двигателей постоянного тока является способ определения положения ротора двигателя. Для этого существует два варианта решения: либо с помощью датчиков положения, либо путем измерения напряжения на незадействованной в данный момент времени обмотке. Датчики положения могут быть оптические, индуктивные, магнитные и т. д. В настоящее время чаще всего используются датчики на основе эффекта Холла (рис. 16), их число равно числу фаз.

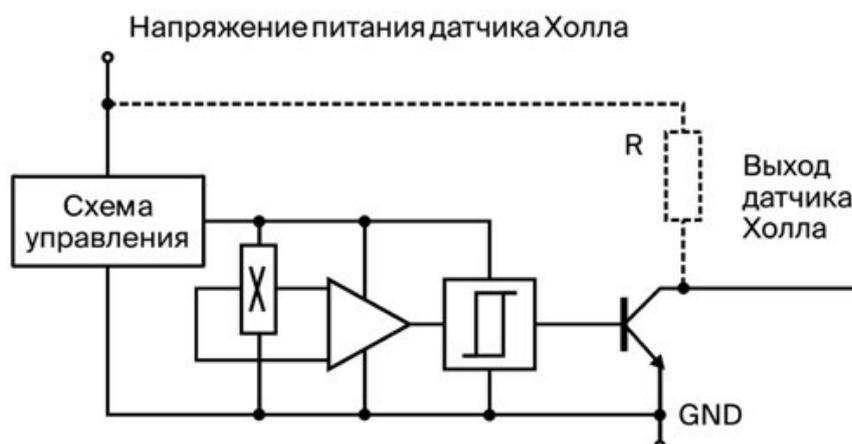


Рисунок 16 – Схема датчика Холла: потребление тока датчика составляет примерно 4 мА (на выходе – высокий уровень), резистор R, как правило, внешний, используется в качестве подтяжки

Благодаря датчикам электронный блок управления всегда «знает», в каком положении находится ротор и на какие обмотки подавать напряжение в каждый момент времени.

Двигатели с датчиками положения предпочтительней с технической точки зрения. Алгоритм управления такими двигателями значительно проще, но конструктивное решение двигателя – сложнее, так как требуется установить датчики и подать к ним питание.

Если по условиям работы датчики Холла не требуются, то используется решение без датчиков. Конструктивно такие двигатели практически не отличаются от двигателей с датчиками, кроме того, что их выводы – это только цепи подключения обмоток. А вот схема управления в этом случае получается сложной и, как правило, не универсальной: выполняется под конкретную модель двигателя, а иногда даже под режим его функционирования.

Если говорить кратко, то в случае, если двигатель стартует под нагрузкой, применяют двигатели с датчиками. Если двигатель стартует без нагрузки на валу, можно применять двигатели без датчиков. Двигатель без датчиков положения должен стартовать без нагрузки на валу. Кроме того, в момент старта двигателя без датчиков возможны вращательные колебания оси двигателя в разные стороны. Если это критично для конечного приложения, то необходимо применять двигатели с датчиками. Не менее важный вопрос – это минимальная скорость, которую можно обеспечить с датчиками Холла или для бездатчикового двигателя. Управление по датчикам Холла позволяет достичь более низких скоростей, чем бездатчиковое управление, хотя и не таких низких, как управление с обратной связью по датчику положения.

Еще один важный момент – это режим коммутации обмоток двигателя. Коммутация может быть ступенчатая или синусоидальная.

При синусоидальной коммутации для получения с помощью электроники синусоидального тока в обмотках двигателя используются датчики положения высокого разрешения. Токи, протекающие через три обмотки двигателя, зависят от положения ротора и сдвинуты в каждой фазе на 120° (синусоидальная коммутация). Это приводит к плавному и точному движению и, как следствие, к высокому качеству управления движением.

Особенности синусоидальной коммутации: требует применения более дорогой электроники, отсутствие пульсаций момента, плавное движение даже на низких скоростях, способность развивать момент примерно на 5 % больший, чем при ступенчатой коммутации. Этот тип коммутации применяется для высокودинамичных сервоприводов и при решении задач позиционирования.

Ступенчатая, или блочная, коммутация может быть реализована как в двигателях с датчиками Холла, так и без них. В первом случае положение ротора определяются тремя встроенными датчиками Холла. Расположение датчиков Холла с шагом 120° обеспечивает шесть различных комбинаций переключения на один оборот. Три секции обмотки в соответствии с информацией от датчиков

подключаются в шести различных состояниях коммутации. Кривые тока и напряжения имеют ступенчатый вид. Для получения максимального момента момент переключения каждой фазы смещен на 30° .

Особенности ступенчатой коммутации: электроника относительно простая и привлекательная по цене, пульсация момента составляет примерно 14%, управляемый пуск двигателя, возможность высоких значений пускового тока и ускорения. Этот тип коммутации находит применение в сервоприводах, при работе в старт-стоповых режимах и при решении определенных задач позиционирования. При выборе двигателей необходимо помнить, что данные в спецификациях на бесколлекторные двигатели постоянного тока указаны для изделий именно со ступенчатой коммутацией.

Если используется ступенчатая коммутация без датчиков положения, то положение ротора определяется по изменению индуцируемого в обмотке напряжения (ЭДС). Электроника платы управления выделяет момент перехода ЭДС через нуль и коммутирует ток двигателя через интервал, зависящий от скорости вращения вала (30° электрических после прохождения ЭДС через нуль). Амплитуда индуцируемой ЭДС зависит от скорости. При неподвижном роторе или низкой скорости этот сигнал слишком мал, и пересечение нулевой отметки не может быть точно определено. Поэтому для пуска в ход требуются специальные алгоритмы (сходные с управлением шаговым двигателем). Чтобы обеспечить коммутацию бесколлекторных двигателей постоянного тока без применения датчиков, обычно с помощью электроники создается искусственная нулевая точка.

Особенности бездатчиковой ступенчатой коммутации: пульсация момента около 14 %, неопределенный момент пуска, неприменимость для работы на низких скоростях и для высокодинамичных приложений, такой двигатель преимущественно используется для длительной работы на высоких скоростях. Пояснение изложенных выше принципов коммутации показано на рис. 17.

Что касается организации обмоток, то ромбическая фирменная обмотка статора двигателей разделена на три секции, магнитные оси которых смещены на 120° . Секции обмотки могут быть соединены двумя различными способами – «звездой» (Y-схема) или «треугольником» (Δ-схема) (рис. 18).

В основном вентильные двигатели применяются в автомобилях: приводы стеклоподъемников, дворников, вентиляторов отопителя. В бытовой технике: электробритвы, пылесосы, кухонные миксеры. В качестве исполнительных электродвигателей в робототехнике, сервоприводах, конвейеры и т.п. В электронике: компьютерные дисководы и охлаждающие кулеры.

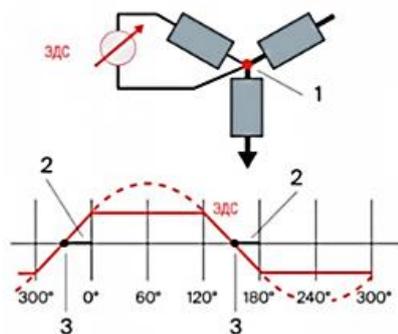
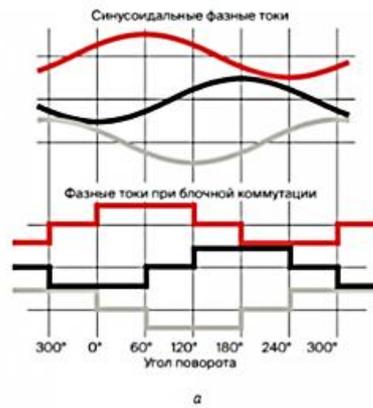


Рисунок 17 – Варианты коммутации обмоток бесколлекторных двигателей постоянного тока: а – формы токов при различных видах коммутации; б – временная диаграмма ступенчатой коммутации при использовании датчиков Холла; в – временная диаграмма ступенчатой коммутации без использования датчиков

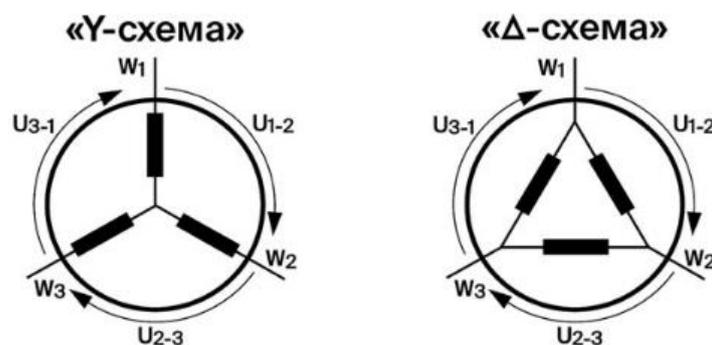


Рисунок 18 – Схемы включения обмоток бесколлекторных двигателей постоянного тока «звездой» и «треугольником»

1.1.1.6 ПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При пуске электродвигателя постоянного тока из состояния покоя ($\omega=0$) ЭДС, наводимая в обмотке якоря, равна нулю. Следовательно, в соответствии с уравнением (1.1) пусковой ток I ограничивается только сопротивлением R обмотки якоря. Поскольку сопротивление цепи якоря невелико, при пуске с номинальным напряжением ток якоря в 10...50 раз может превысить свое номинальное значение. Такой ток недопустим ни для щеток (из-за чрезмерных плотностей тока и сильного искрения под ними), ни для обмоток (из-за больших электродинамических усилий, пропорциональных квадрату тока якоря), ни для сети (из-за больших падений напряжения в ней). Кроме того, в соответствии с формулой (1.4), пропорционально росту тока увеличивается электромагнитный момент двигателя, что может привести к поломке узла, соединяющего вал двигателя и приводимого механизма. По условиям работы коллекторно-щеточного узла допустимый пусковой ток не более чем в 2,5 раза может превышать номинальный [11]. Таким образом, прямой пуск (прямое включение в сеть) допустим только для двигателей малой мощности с относительно большим сопротивлением цепи якоря. Пусковой ток мощных двигателей необходимо уменьшать до допустимых значений, что достигается снижением подводимого напряжения или включением последовательно с обмоткой якоря добавочного активного сопротивления или пускового реостата. Поскольку пуск двигателя при помощи реостата подразумевает ручное воздействие и его автоматизация нецелесообразна, в настоящем пособии этот способ рассматриваться не будет. Узнать об этом способе и о характеристиках пусковых реостатов можно из книг [6, 9 – 11]. Пуск при пониженном напряжении можно осуществить, если двигатель подключен к отдельному регулируемому источнику постоянного тока. В этом случае при включении двигателя напряжение источника плавно увеличивают от начального до номинального значения, что позволяет избежать больших толчков тока. Начальное напряжение при пуске должно обеспечивать пусковой ток, не превышающий допустимое значение. По сути, такой способ является регулированием частоты вращения, например, при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ), и рассмотрен в соответствующем пункте настоящей главы. Рассмотрим автоматизированный пуск электродвигателя постоянного тока при помощи добавочных сопротивлений. На рисунке 19 представлена электрическая принципиальная схема устройства автоматического пуска электродвигателя постоянного тока [8].

Схема работает следующим образом.

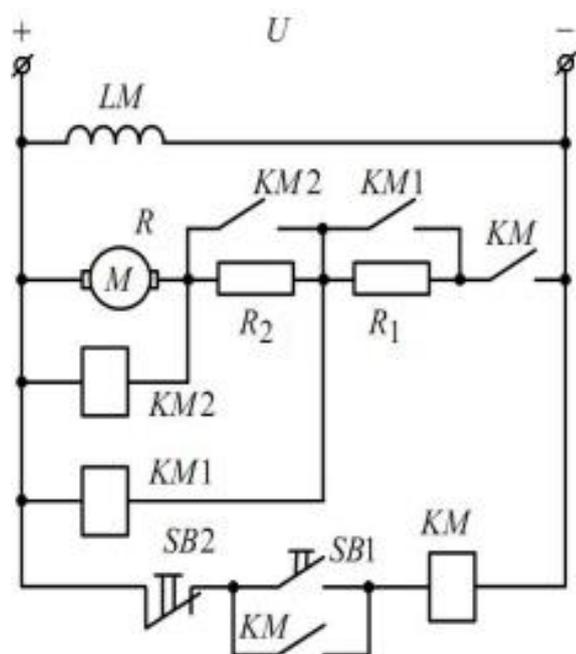


Рисунок 19 – Электрическая принципиальная схема устройства автоматического пуска электродвигателя постоянного тока

После подачи напряжения на схему силовых цепей двигателя по обмотке возбуждения LM начинает течь ток, формирующий номинальный магнитный поток Φ . При нажатии кнопки SB1 «Пуск» обмотка контактора [9] KM получает питание, он срабатывает и самоблокируется, т.е. параллельно кнопке SB1 замыкается вспомогательный контакт KM. При отпускании кнопки SB1 напряжение на обмотке KM сохраняется. Кроме того, замыкается силовой контакт KM в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгоняться с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями $R1$ и $R2$. По мере разгона двигателя растет ЭДС обмотки якоря, в результате чего увеличивается напряжение на обмотках контакторов KM1 и KM2. При достижении двигателем скорости ω_1 значение ЭДС на контакторе KM1 становится достаточным для его срабатывания. Контакт KM1 замыкается и шунтирует резистор $R1$. По мере дальнейшего разгона двигателя при скорости ω_2 срабатывает контактор KM2 и шунтирует резистор $R2$. Двигатель переходит на естественную механическую характеристику и разгоняется по ней до установившейся скорости, определяемой нагрузкой. Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку SB2 «Стоп». Контактор KM теряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения U . Торможение электродвигателя происходит «выбегом», т.е. за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе. Ознакомиться со схемами пуска электродвигателей других типов

возбуждения и процессами, происходящими в них, можно, изучив соответствующие главы пособий [8, 9].

1.1.1.7 ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В связи с необходимостью точного позиционирования рабочего органа в мехатронных системах часто возникает особая необходимость своевременного торможения электродвигателей. Для того чтобы быстро остановить механизм или уменьшить его скорость, наряду с механическими применяются и электрические способы. Для понимания механизма электрического торможения обратимся к уравнению (1.1), из которого следует, что пока напряжение U источника питания больше ЭДС E индукции, ток I положительный, а момент M действует в направлении вращения. Как только напряжение $U < E$, ток I становится отрицательным, в результате чего, как следует из формулы (1.4), меняет знак и момент M . Он становится тормозным. Процессы разгона и торможения происходят в электрической машине всегда при условии, что якорь включен в сеть. Если для остановки двигателя просто отключить якорь от сети, то цепь окажется разомкнутой, ток якоря станет равным нулю и не сможет создать тормозной момент. Уменьшение частоты вращения будет происходить только за счет механических потерь различного рода в течение сравнительно большого интервала времени. Следовательно, для эффективного торможения необходимо тем или иным способом оставить якорь включенным в какую-либо электрическую цепь. В машинах постоянного тока применяют три способа электрического торможения [9, 11]:

- динамическое;
- рекуперативное;
- противовключением.

При динамическом торможении электрическая машина работает в режиме автономного генератора, при рекуперативном – в режиме генератора, параллельного сети, при торможении противовключением – в режиме электрического тормоза. В режиме динамического торможения при включенной обмотке возбуждения цепь якоря замыкают на внешнее активное сопротивление R_b . Тогда напряжение U источника становится равным нулю, а цепь якоря состоит из двух, последовательно соединенных сопротивлений R и R_b . Ток I меняет направление и определяется только величиной ЭДС и этими сопротивлениями. Из уравнения (1.5) механической характеристики получим

$$M = - \frac{(k\Phi)^2}{R+R_b} \omega \quad (1.9)$$

Из уравнения (1.9) видно, что механическая характеристика электрической машины постоянного тока является прямой, проходящей через начало координат [9, 11]. Максимальная эффективность торможения (максимальное значение момента M) достигается при замыкании якоря накоротко ($R_b = 0$). Во время торможения по мере уменьшения частоты вращения ω уменьшается ЭДС E , ток I и тормозной момент M (см. уравнение 1.9). Поэтому основным недостатком динамического способа является низкая эффективность торможения при малых частотах вращения. При рекуперативном торможении электродвигатель не отключается от сети, а ЭДС E индукции тем или иным способом повышают до значений, превышающих напряжение U сети.

Регулировка магнитного потока шунтовой обмотки позволяет эффективно регулировать тормозной момент. При большом магнитном потоке в обмотках якоря вырабатывается высокая ЭДС даже на малой частоте вращения. Если эта ЭДС превышает напряжение сети, то электродвигатель пополняет сеть электрической энергией за счет кинетической энергии движущихся частей машины. Рекуперативное торможение прекращается при падении ЭДС меньше напряжения сети в результате уменьшения частоты вращения. При малом магнитном потоке шунтовой обмотки торможение происходит лишь при высокой частоте вращения. Для увеличения эффективности рекуперативного торможения целесообразно использовать устройства, повышающие напряжение, вырабатываемое электрической машиной. Как уже отмечалось рекуперативное торможение эффективно на электротранспорте, когда тормозящие и скатывающиеся со спуска составы частично обеспечивают энергией разгоняющиеся и поднимающиеся в гору, снижая тем самым общее энергопотребление транспортной сети. В электротранспорте часто применяют электродвигатели с последовательным возбуждением, для которых применить рекуперативное торможение невозможно [11]. По этой причине вместо электродвигателей с последовательным возбуждением используют электродвигатели со смешанным возбуждением. При этом серийную обмотку используют в основном двигательном режиме, а шунтовую (которая может быть и независимой) – в режиме рекуперативного торможения. Для перехода в режим торможения противовключением изменяют полярность подводимого к якорю напряжения, в результате чего ЭДС E и напряжение U становятся совпадающими по направлению. По сути, это режим пуска двигателя в противоположном направлении. Условия такого пуска существенно хуже обычных, так как при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ток I может более чем в два раза превышать ток пуска из состояния покоя. Такой ток крайне нежелателен как для самого электродвигателя, так и для сети. Поэтому торможение противовключением целесообразно применять только при

малой частоте вращения, когда остальные способы торможения малоэффективны. Важным моментом при торможении противовключением является необходимость отключения двигателя от сети при достижении состояния покоя, так как в противном случае его вал начнет вращаться в противоположную сторону.

В мехатронных системах все операции торможения целесообразно осуществлять в автоматическом режиме с использованием информации от датчиков частоты вращения и импульсных реверсивных регуляторов напряжения, применяя различные способы торможения на его различных его этапах.

1.1.1.8 ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ЯКОРЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как уже было отмечено, для изменения направления вращения электродвигателя постоянного тока достаточно изменить полярность подключения якоря или обмотки возбуждения. У двигателя постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом возможно только изменение полярности подключения якоря. Эта простая для теоретической электротехники процедура на практике часто требует существенных затрат. При ручном управлении требуется две контактные группы, а в случае электронного управления необходимы, по меньшей мере, четыре электронных ключа. Более удобны реверсивные электродвигатели, обмотка возбуждения которых состоит из двух секций, создающих встречные магнитные потоки. Для управления направлением вращения такого электродвигателя достаточно иметь один переключатель или два электронных ключа, но такие электродвигатели применяются чрезвычайно редко. На рисунке 20 представлена схема управления направлением вращения электродвигателем постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом с использованием электромагнитных реле или контакторов. Питание реле может быть реализовано, как от отдельного источника, так и от источников питания микроконтроллера или электродвигателей мехатронной системы. Для управления электродвигателем требуется две линии порта микроконтроллера или другого управляющего устройства.

В исходном состоянии на вход схемы с выходов микроконтроллера подаются логические сигналы нулевого уровня. Напряжение на базах транзисторов VT1 и VT2 близки к нулю, они закрыты. По обмоткам реле K1 и K2 не протекает ток, оба вывода электродвигателя M1 подключены к плюсу источника питания, т.е. замкнуты накоротко. Это обеспечивает автоматическое торможение двигателя в исходном состоянии и после окончания управляющих импульсов на входе схемы. При подаче на линию «Вперед» сигнала логической единицы (напряжение около 5 В) через резистор R1 и эмиттерный

переход транзистора VT1 начинает протекать ток, который вызывает появление тока коллектора через обмотку реле K1. В реле K1 переключается контакт K1.1, который обеспечивает подключение левого по схеме вывода электродвигателя M1 к минусу источника питания. После этого через электродвигатель протекает ток, его ротор вращается в одном из направлений. Остановка электродвигателя обеспечивается снятием сигнала логической единицы на линии «Вперед». Через эмиттерный переход транзистора VT1 перестает течь ток, он закрывается, реле K1 отключается, контакт K1.1 возвращается в исходное состояние, двигатель тормозится

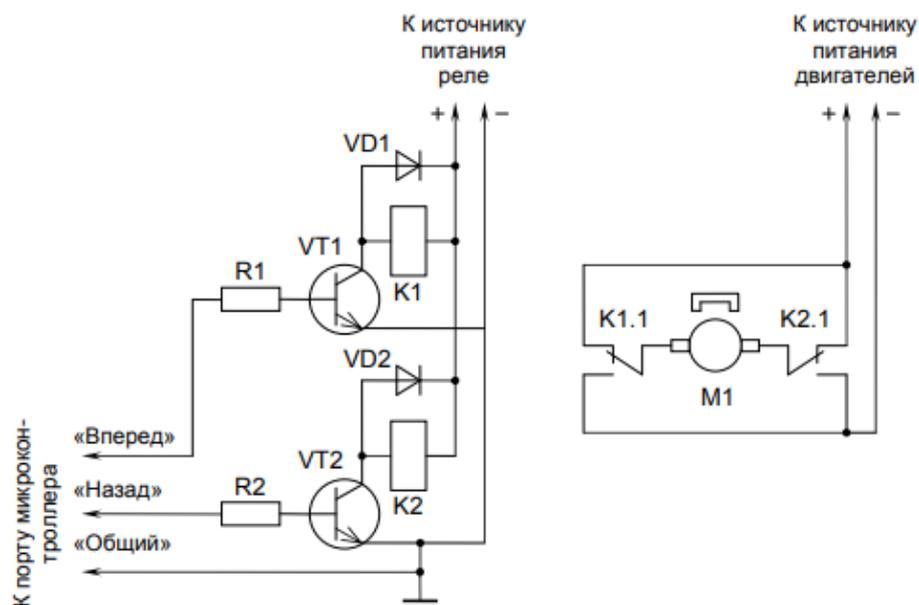


Рисунок 20 – Электрическая принципиальная схема управления направлением вращения электродвигателя с использованием электромагнитных реле

Аналогично, при подаче сигнала логической единицы на линию «Назад» открывается транзистор VT2, срабатывает реле K2 и переключается контакт K2.1. К минусу источника питания подключается правый по схеме вывод электродвигателя M1, и его ротор вращается в противоположную сторону. Подача двух единиц на оба входа схемы («Вперед» и «Назад») не является аварийной ситуацией, так как в этом случае также обеспечивается торможение в результате замыкания выводов электродвигателя на минусе источника питания. Недостатки схемы на рис. 20 обусловлены применением контактных элементов – электромагнитных реле или контакторов K1 и K2.

Это снижает надежность схемы и ограничивает возможности регулировки частоты вращения электродвигателя путем ШИМ, так как контактные элементы имеют ограниченное число переключений. К достоинствам схемы следует отнести ее простоту и обеспечение гальванической развязки силовой

части (электродвигатели) от управляющей (микроконтроллер). В схеме транзисторы VT1 и VT2 выполняют роль электрических ключей и предназначены для коммутации сравнительно большого тока в обмотках реле K1 и K2 при помощи слаботочных сигналов микроконтроллера. Диоды VD1 и VD2 необходимы для защиты транзисторов от высокого напряжения. При отключении при помощи транзистора обмотки реле в результате ее высокой индуктивности на коллекторе формируется импульс высокого напряжения, значительно превышающего напряжение питания. В отсутствие диода такой импульс может пробить транзистор, и он выйдет из строя. Диод, включенный при протекании тока по обмоткам реле обратно, во время действия импульса включается прямо. Напряжение на коллекторе превышает напряжение питания на величину, не бóльшую, чем нужно для открытия диода в прямом направлении (не более 1 В). Энергия, запасенная в магнитном поле обмоток реле, возвращается источнику питания. Резисторы R1 и R2 необходимы для ограничения тока баз транзисторов VT1 и VT2. При отсутствии резисторов эмиттерные переходы транзисторов полностью открываются, так как напряжение логической единицы существенно больше напряжения, необходимого для их открытия (около 0,6 В). Через порт микроконтроллера и базы транзисторов течет максимально возможный ток, который может повредить как порт, так и транзисторы. Расчет и выбор элементов для схемы начинают с реле K1 и K2. Их контакты должны обеспечивать коммутацию в цепи постоянного тока с номинальными значениями силы тока и напряжения электродвигателя.

Напряжение, на которое рассчитаны обмотки реле, выбирают исходя из имеющихся в мехатронной системе или возможных. Предельно допустимое обратное напряжение диодов VD1 и VD2 должно быть больше напряжения питания реле, например, в 1,5 раза. Их предельно допустимый прямой ток определяется индуктивностью обмоток реле. Предельно допустимое напряжение коллектор–эмиттер транзисторов VT1 и VT2 должно превышать напряжение питания реле K1 и K2. Для эффективного использования транзисторов предельно допустимый ток их коллекторов целесообразно выбрать как минимум в два раза большим, чем номинальный ток обмоток реле, так как при токе, близком к максимальному, существенно уменьшается коэффициент усиления. Номинальный ток обмотки реле можно определить по закону Ома через номинальное напряжение и сопротивление обмоток. Коэффициент усиления – коэффициент $h_{21Э}$ передачи тока от коллектора к базе в схеме с общим эмиттером – выбирают исходя из отношения номинального тока в обмотках реле к допустимому току базы.

Для обеспечения полного открытия транзистора целесообразно выбирать транзистор с коэффициентом $h_{21Э}$, значительно больше расчетного (до

10 раз). В этом случае на нем при любом токе будет минимальное падение напряжения и мощность. Ток базы выбирают исходя из допустимых значений тока для отдельной линии порта микроконтроллера, для всего порта и всего микроконтроллера, а также с учетом желаемого энергопотребления всей схемы.

Выборанный ток базы транзисторов определяет сопротивление резисторов R1 и R2. Эти значения определяются по закону Ома с использованием напряжения сигнала логической единицы, из которого нужно вычесть падение напряжения на эмиттерном переходе (0,6 В). Для надежной работы системы мощность рассеяния резистора должна быть не менее чем в два раза больше расчетной, т.е. произведения тока базы транзистора на падение напряжения на резисторе. Для повышения надежности и увеличения быстродействия схемы управления электродвигателем целесообразно использовать электронные ключи: биполярные и полевые транзисторы.

Схемы управления на транзисторах позволяют не только изменять направление вращения, но и регулировать скорость посредством широтно-импульсной модуляции управляющих сигналов. На рисунке 21 представлена мостовая схема управления электродвигателем постоянного тока малой мощности.

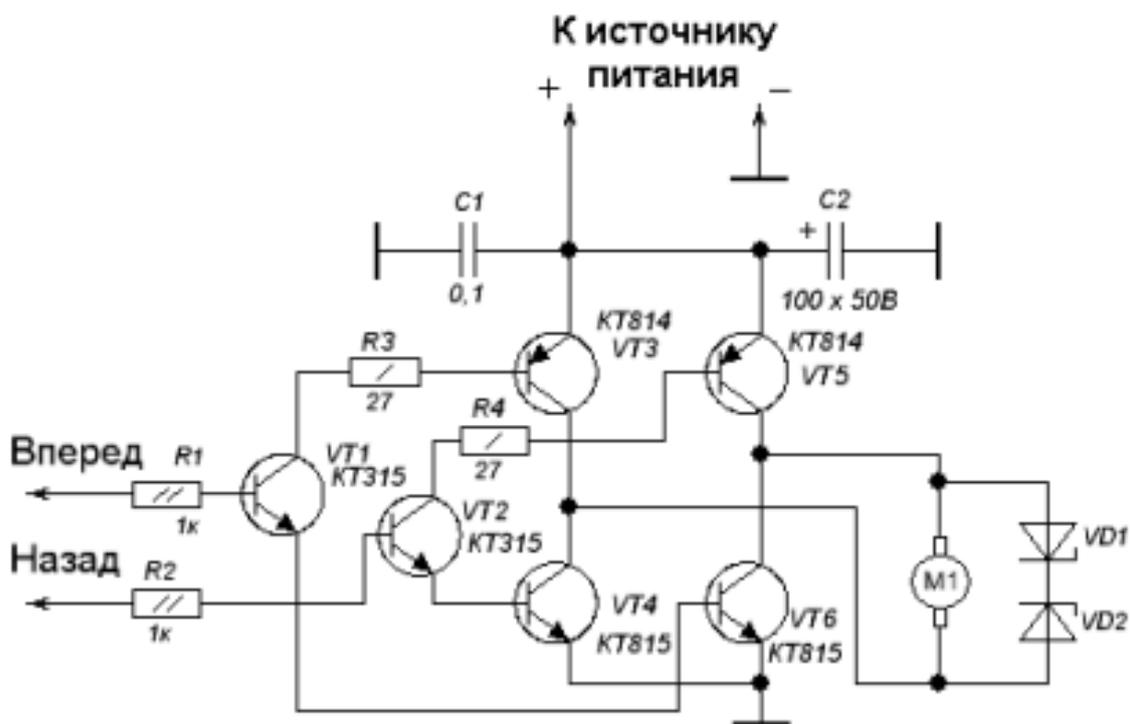


Рисунок 21 – Электрическая принципиальная схема управления направлением вращения электродвигателя с использованием биполярных транзисторов

Кроме позиционных обозначений, на схеме для пассивных компонентов указаны их номиналы, емкости в мкФ и сопротивления в Ом и кОм, а для транзисторов – типы. На резисторах обозначена их мощность рассеяния.

Конденсаторы С1 и С2 являются фильтром питания. Они снижают проникновение коммутационных помех от щеток электродвигателя и процессов управления во внешнюю цепь. Все резисторы предназначены для ограничения тока в базовых цепях транзисторов (см. описание схемы на рис. 19). Схема на рис. 21 работает следующим образом. В исходном состоянии при сигналах уровня логического нуля на обоих входах схемы транзисторы VT1 и VT2 закрыты, а, следовательно, закрыты и транзисторы VT3...VT6, так как ток через их базы может течь только при наличии тока в коллекторной цепи транзисторов VT1 и VT2. Электродвигатель М1 отключен от источника питания, его вал не вращается.

При подаче логической единицы на вход «Вперед» возникает электрический ток через резистор R1 и эмиттерные переходы транзисторов VT1 и VT6. Эти транзисторы открываются, в результате чего ток протекает и через резистор R3 и эмиттерный переход транзистора VT3. Он также отрывается. Транзистор VT3 обеспечивает подключение нижнего по схеме вывода электродвигателя к плюсу источника питания, а транзистор VT6 – верхнего вывода к минусу. Вал двигателя М1 начинает вращаться в прямом направлении. Для остановки двигателя необходимо снять сигнал логической единицы с входа «Вперед». При подаче логической единицы на вход «Назад» открываются транзисторы VT2, VT4 и VT5. При этом полярность подключения электродвигателя М1 к источнику питания противоположна рассмотренной выше. Его вал вращается в обратном направлении. Подавать сигналы единичного уровня на оба входа схемы нельзя, так как в этом случае открываются все транзисторы VT3...VT6, что приводит к короткому замыканию источника питания и при отсутствии устройств защиты выводит из строя транзисторы или источник питания. Динамическое торможение в схеме на рис. 21 невозможно. Сопротивление резисторов R3 и R4 значительно меньше сопротивлений R1 и R2, так как для управления мощными выходными транзисторами VT3...VT6 требуется большой ток. В мостовой схеме на рис. 21 для ограничения импульса напряжения при отключении электродвигателя применены стабилитроны. Напряжение стабилизации необходимо выбирать бóльшим, чем напряжения питания, так как в противном случае при включении двигателя возникнет короткое замыкание. Вместо стабилитронов можно использовать четыре диода, включенные обратно между каждым выводом электродвигателя и каждым полюсом источника питания. Для повышения надежности схемы и обеспечения возможности динамического торможения целесо-

образно включать выходные транзисторы с общим коллектором, а их базы подключать к выходу усилителя напряжения. В этом случае может потребоваться больше, чем шесть транзисторов, а схема их соединения зависит от соотношения напряжений управляющих сигналов и источника питания.

Максимальная мощность электродвигателя M1, который можно использовать в схеме, ограничивается максимально допустимыми значениями токов (до 1 А) и напряжений (до 40 В) выходных транзисторов. Для управления мощными электродвигателями необходимо выбрать более мощные радиодетали. Схема останется прежней. Однако силовые ключи, построенные на биполярных транзисторах, имеют ряд серьезных недостатков, главными из которых являются [4]:

- низкое быстродействие, по сравнению с силовыми ключами других типов;
- низкий коэффициент передачи по току в области больших нагрузок и, как следствие, сложность и большая стоимость систем управления;
- малая стойкость к перегрузкам.

В настоящее время биполярные транзисторы почти полностью вытеснены более эффективными силовыми ключами, кроме устройств массового применения, где определяющим фактором является низкая стоимость на единицу мощности. Удобно использовать полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET или МОП) [4]. В отличие от биполярных транзисторов они управляются не током, а напряжением. По этой причине при разработке мостовой схемы необходимо учитывать соотношение напряжения источника питания и напряжения управления. Привести одну схему для различных случаев затруднительно. Какие бы элементы не использовались в мостовой схеме управления электродвигателем постоянного тока, она является сложной. Поскольку вариант ее реализации в большинстве применений не имеет значения, целесообразно применять специализированные микросхемы и блоки для управления коллекторными электродвигателями, широкая номенклатура которых выпускается производителями электроники разных стран для различных отраслей промышленности. Это, например, микросхемы AN8377N, AN8389S для CD-проигрывателей, универсальная микросхема L293D, микросхемы BTS7700G, BTS7750GP для электрооборудования автомобилей. Ознакомиться с устройством этих микросхем можно с использованием официальной документации производителя (datasheet), которую несложно найти в сети Интернет по наименованию микросхемы. Такие микросхемы, как правило, допускают подачу любой комбинации входных сигналов и обеспечивают возможность режима динамического торможения, а также имеют в своем составе специализированные блоки ШИМ.

Выбор микросхем для управления маломощными электродвигателями постоянного тока очень широк. Для поиска конкретной микросхемы целесообразно использовать соответствующие справочные издания, например, книгу [13] и сайты сети Интернет. В цепях переменного тока могут эффективно работать схемы с электронным управлением на основе тиристоров [4]. В цепях постоянного тока применение тиристоров неэффективно, так как для отключения (закрывания) тиристора необходимо уменьшить напряжение на нем почти до нуля, т.е. отключить от цепи каким-то другим коммутирующим прибором. В цепях переменного тока такое снижение напряжения обеспечивается автоматически при изменении его полярности в другом полупериоде.

1.1.1.9 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЯКОРЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как следует из уравнения (1.5), регулировать скорость двигателя постоянного тока независимого и параллельного возбуждения можно тремя основными способами:

- изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки якоря двигателя;
- изменением потока Φ возбуждения двигателя;
- изменением подводимого к обмотке якоря напряжения U .

На рисунке 22 представлены графики механических и регулировочных характеристик двигателей постоянного тока при различных способах регулирования и схемы их реализации.

Механические характеристики изображены сплошными линиями, регулировочные – штриховыми. Включение реостата в цепь якоря двигателя для регулирования частоты вращения является наиболее простым и очевидным (рис. 22, а). Увеличение сопротивления R в цепи якоря приводит к уменьшению тока I и напряжения U на его обмотках, в результате чего падает и частота вращения. Регулировочные характеристики (зависимости $\omega(R)$ частоты вращения от сопротивления добавочного резистора) при этом способе регулирования линейны. Регулирование возможно только в области скоростей вращения ниже номинальной.

Несмотря на линейность регулировочных характеристик, регулирование частоты вращения сопряжено с рядом трудностей.

Это связано с тем, что при изменении сопротивления R жесткость механических характеристик существенно изменяется (см. рис. 22, а).

Поэтому при малом моменте нагрузки большие изменения сопротивления не приведут к значительному изменению частоты вращения, а при большом – даже незначительное увеличение сопротивления может привести к остановке двигателя.

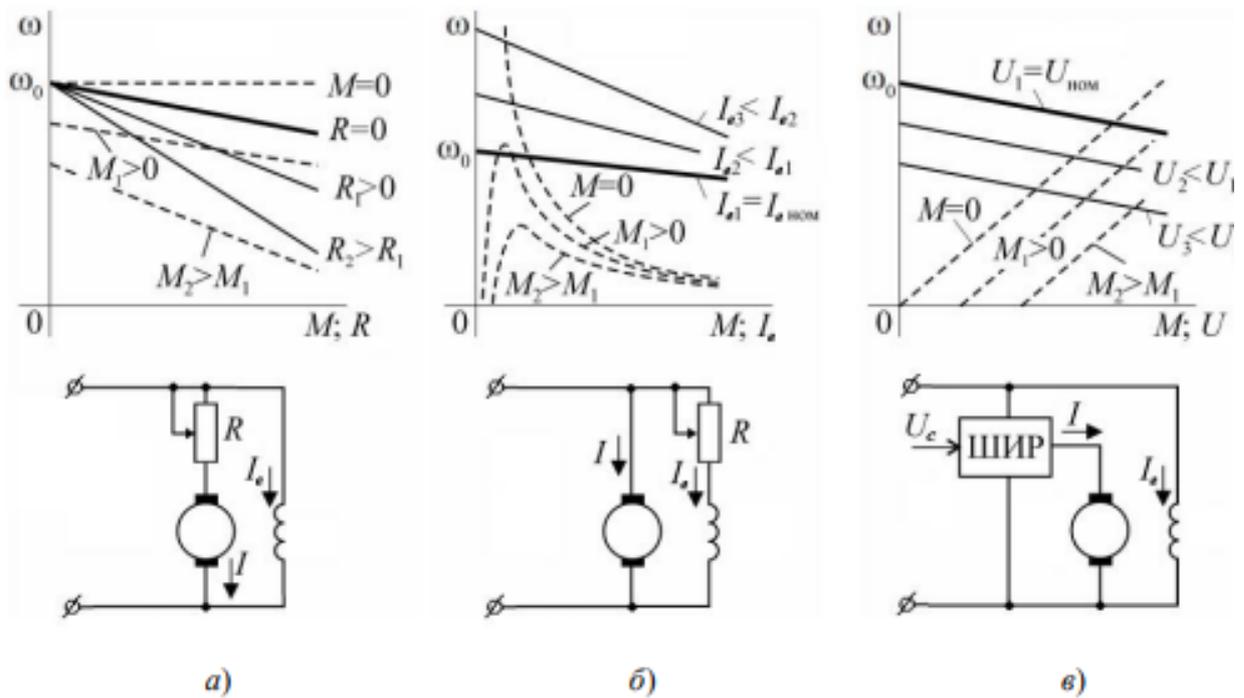


Рисунок 22 – Характеристики электродвигателей постоянного тока и схемы реализации различных способов регулирования

Уменьшение жесткости механических характеристик является существенным недостатком рассматриваемого способа регулирования, однако более важным фактором, препятствующим его применению, являются высокие потери. Через реостат протекает весь ток якоря двигателя, поэтому, например, при равенстве напряжений на добавочном сопротивлении и якоре они будут потреблять одинаковую мощность от источника. Потери составят половину используемой энергии.

При этом необходимо применять мощный реостат и обеспечивать его охлаждение. В современных приводах включение добавочного сопротивления в цепь якоря находит применение только в устройствах ограничения пусковых токов (см. рис. 19).

Значительно уменьшить потери при регулировании частоты вращения двигателей с электромагнитным возбуждением можно путем изменения тока возбуждения I_e . Изменение тока приводит к изменению магнитного потока Φ , который в соответствии с (1.5) оказывает непосредственное влияние на частоту ω . Уменьшение потерь при использовании этого способа по сравнению с регулированием в цепи якоря достигается в результате того, что мощность цепи возбуждения значительно меньше мощности цепи якоря. Регулирование скорости вращения изменением величины магнитного потока главных полюсов называется полюсным. При уменьшении магнитного потока ниже номинального, например, путем установки добавочного резистора в цепь обмотки возбуждения, частота вращения возрастает (см. рис. 22, б) и может превысить

номинальную. По этой причине этот способ регулирования возможен только для тех двигателей, которые допускают такое повышение частоты вращения.

Регулировочные характеристики $\omega(I_e)$ двигателя при полюсном управлении нелинейны. При нулевом моменте нагрузки регулировочная характеристика представляет собой гиперболу, а при нагрузке отличной от нуля – кривую второго порядка, имеющую максимум в области малых токов возбуждения. Нелинейность и неоднозначность регулировочных характеристик являются большими недостатками полюсного управления, которые нужно учитывать при разработке и эксплуатации. Другим недостатком, так же, как и в случае добавочного сопротивления в цепи якоря, является уменьшение жесткости механических характеристик. Сложность изменения механических и регулировочных характеристик затрудняет регулирование частоты вращения. Изменение магнитного потока влияет не только на скорость вращения, но и на вращающий момент двигателя. При увеличении скорости уменьшается момент и наоборот. Механические характеристики рабочих органов, как правило, имеют противоположную зависимость. Поэтому при регулировке частоты вращения необходимо обратное – одновременное увеличение и скорости и момента. Достоинством полюсного способа регулирования являются возможность получения при номинальном напряжении питания скоростей вращения, превышающих номинальную скорость.

Несмотря на то, что при полюсном регулировании потери мощности значительно снижены, применение активного сопротивления в любых схемах неэффективно. Резистор преобразует энергию не в полезную работу, а в тепло. Необходимо обеспечивать его охлаждение. Возникают трудности при необходимости автоматического или дистанционного электронного управления. Особо отметим, что в мехатронных системах использование реостатов совершенно неприемлемо. Получить дополнительную информацию по якорному и полюсному управлению при помощи реостатов можно в пособиях [8 – 11]. Как в цепи якоря, так и в цепи обмотки возбуждения целесообразно использовать регуляторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Ввиду линейности механических и регулировочных характеристик такой регулятор предпочтительно включать в цепь якоря (рис. 22, в). Широтно-импульсный регулятор (ШИР) позволяет изменять среднее напряжение на обмотке якоря. При этом схема регулятора отличается малым энергопотреблением. Регулировочные характеристики $\omega(U)$ при ШИМ напряжения питания являются линейными, а жесткость механических характеристик не изменяется. Увеличение частоты вращения сопровождается увеличением вращающего момента. Применение ШИР является чрезвычайно удобным и выгодным во всех устройствах. По этой причине многие управляющие микро-

контроллеры имеют в своем составе модули ШИМ, которые на аппаратном уровне вырабатывают требуемый ШИМ-сигнал. В цепях переменного тока для регулирования используют управляемые выпрямители [4]. Принцип работы ШИР заключается в изменении скважности импульсов напряжения питания якоря, подаваемых с заданной частотой. Скважностью называется отношение периода следования импульсов к их длительности. Например, если период в два раза превышает длительность импульса, то скважность равна двум. В крайних случаях, когда напряжение питания постоянно или равно нулю, скважность соответственно равна единице или бесконечности. На рисунке 1.16 представлены временные диаграммы работы ШИР при различных значениях выходного напряжения. На рисунке 23, а приведен график изменения выходного напряжения регулятора, когда длительность импульса составляет десятую часть периода.

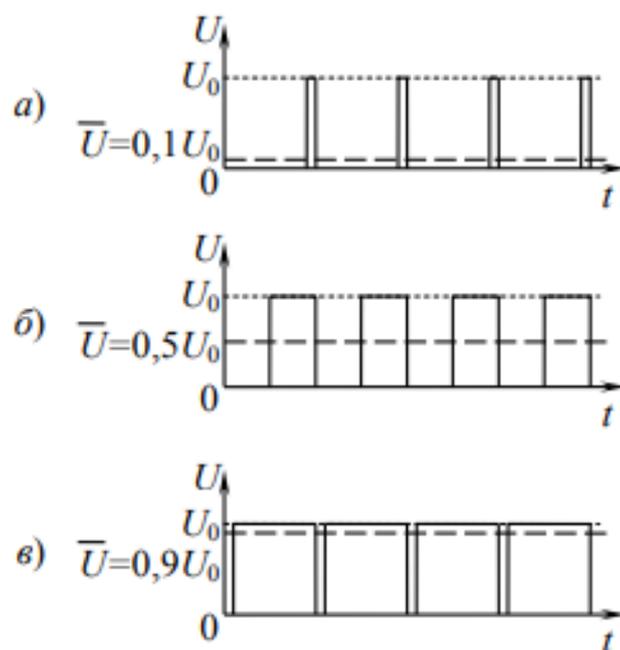


Рисунок 23 – Временные диаграммы работы ШИР при различных значениях U выходного напряжения: сплошные линии – диаграммы изменения выходного напряжения U ; штриховые – среднее (действующее) значение U выходного напряжения

Среднее и действующее значение U выходного напряжения соответственно составляет десятую часть напряжения U_0 питания регулятора. На рисунке 23, б и в приведены графики изменения напряжения регулятора при U , равном 50% и 90% от U_0 соответственно. При использовании ШИР для питания электродвигателей нет необходимости сглаживать импульсы его выходного напряжения, так как ротор будет вращаться равномерно благодаря своему моменту инерции. В случае использования ШИР для питания устройств,

не допускающих пульсации питающего напряжения, на выходе ШИР ставится сглаживающий фильтр из конденсаторов и, при необходимости, катушек индуктивности (дресселей). Это не ухудшает работу регулятора, но делает выходное напряжение постоянным, близким к тому, как оно показано штриховыми линиями на рис. 23.

Для формирования импульсов выходного напряжения в ШИР могут быть использованы любые ключевые элементы, в том числе и электромагнитные, однако для повышения надежности электрической схемы целесообразно использовать полупроводниковые приборы: биполярные и полевые транзисторы, тиристоры. Эти приборы работают в ключевом режиме. Для работы выходных полупроводниковых приборов в ключевом режиме схема должна обеспечить только два устойчивых состояния: «полностью открыт» и «полностью закрыт». При последовательном соединении транзистора и нагрузки (рис. 24) имеет место уравнение:

$$U_{КЭ}(I) = U_0 - IR, \quad (1.10)$$

где $U_{КЭ}$ – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора, В;

I и R – ток и сопротивление нагрузки, А и Ом;

U_0 – напряжение питания ШИР, В.

График этой функции называется нагрузочной линией [14]. Мощность, выделяющаяся на транзисторе, определяется произведением тока в нагрузке на напряжение на транзисторе. Умножив (1.10) на ток I , получим

$$P(I) = U_0 I - I^2 R \quad (1.11)$$

Продифференцировав это уравнение по току I и приравняв производную нулю, можно найти ток, соответствующий максимальной выделяющейся на транзисторе мощности и соответствующее сопротивление коллекторной цепи. Максимальная мощность выделяется на транзисторе, если это сопротивление равно сопротивлению R нагрузки, или при равенстве напряжения $U_{КЭ}$ напряжению на нагрузке.

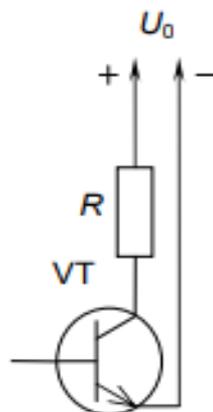


Рисунок 24 – К пояснению ключевого режима работы биполярного транзистора

В ключевом режиме работы в закрытом состоянии ток через транзистор предельно мал ($I \approx 0$), следовательно, мощность P также равна нулю (см. (1.11)), несмотря на то, что напряжение равно напряжению питания U_0 . В открытом состоянии сопротивление коллекторной цепи транзистора близко к нулю, ток определяется исходя из закона Ома:

$$I_0 = \frac{U}{R} \quad (1.12)$$

Подставив (1.12) в (1.10) и (1.11), получим, что $U_{кэ} \approx 0$ и $P \approx 0$, несмотря на высокое значение тока I . Таким образом, в ключевом режиме работы транзистор переходит из одного состояния с минимальным потреблением энергии в другое. По этой причине ШИР имеют два основных преимущества перед пассивными схемами на реостатах. Это, во-первых, высокий КПД, и, как следствие, отсутствие необходимости мощного отвода тепла от регулирующего ключевого элемента. Переход из закрытого состояния в открытое происходит через область с большим потреблением энергии, поэтому он должен быть произведен максимально быстро. Реальные полупроводниковые приборы не могут мгновенно изменить значение тока в цепи [4]. Поэтому на них все же выделяется часть мощности, и их необходимо устанавливать на сравнительно небольшой радиатор. Для управления электродвигателем постоянного тока в режиме ШИМ может быть использована схема на рис 1.14 и другие подобные схемы. В зависимости от требуемого направления вращения на один из входов схемы необходимо подавать импульсы с различной скважностью, что позволит изменять частоту вращения в широком диапазоне. При отсутствии необходимости изменения направления вращения достаточно использовать один силовой ключевой элемент (см. рис. 24).

Кроме ШИМ также существуют:

- длительностно-импульсная модуляция (ДИМ), при которой длительность импульса меняется, а длительность паузы между импульсами остается постоянной;
- времяимпульсная модуляция (ВИМ), при которой длительность импульса постоянна, а время между фронтами импульсов изменяется;
- частотно-импульсная модуляция (ЧИМ), при которой длительность импульсов постоянна, но меняется количество импульсов за определенный промежуток времени. Эти виды модуляции используются значительно реже, а смысл их одинаков и заключается в изменении скважности импульсов. ШИМ сохраняет период следования импульсов постоянным, что позволяет легко согласовывать несколько устройств с различной скважностью ШИМ-сигнала. Большинство микроконтроллеров имеют в своем составе аппаратные блоки ШИМ, а при отсутствии таких блоков они легко реализуются программно при помощи таймера и системы прерываний. В цепях переменного

тока используется аналог ШИМ, при котором нагрузка подключается к сети только в определенную часть полупериода. Для этой цели широко используют тиристоры. Подробно прочитать про регулирование частоты вращения электродвигателей постоянного тока можно в пособиях [3...5]. Регулирование частоты вращения электродвигателей с последовательным возбуждением осуществляется способами, аналогичными рассмотренным. В пассивных схемах с реостатом полюсное регулирование, реализуемое параллельным включением обмотки возбуждения регулируемого резистора, является наиболее экономичным.

1.1.1.10 ЭНКОДЕРЫ И СЕРВОПРИВОДЫ

Электродвигатели постоянного тока в отличие от, например, шаговых, не позволяют обеспечить точное перемещение вала на заданный угол. Стабилизировать частоту вращения и управлять положением вала можно различными путями, однако без применения датчиков положения точность позиционирования рабочего органа будет недостаточной для применения в мехатронной системе. Для получения информации о пройденном угловом перемещении валом электродвигателя постоянного тока применяют специальные устройства – *энкодеры*.

Энкодер или датчик углового перемещения предназначен для создания отрицательной обратной связи. На схеме рис. 1 это датчик Д. Энкодер обеспечивает блок управления БУ информацией о фактическом угловом перемещении вала электродвигателя. БУ сравнивает текущее фактическое перемещение с необходимым перемещением в данный момент времени и формирует соответствующий управляющий сигнал для увеличения или уменьшения скорости вращения. Такая система с обратной связью называется *сервоприводом*.

В общем смысле *сервопривод* – это привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения. *Сервоприводом* является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т.п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно заданному внешнему значению. *Сервопривод* является наиболее близким понятием к термину «исполнительный механизм», используемому в автоматике.

Энкодер – это устройство, преобразующее линейное или угловое перемещение в последовательность сигналов, позволяющих определить величину перемещения.

Можно выделить угловые и линейные энкодеры.

Угловой энкодер – устройство, преобразующее угол поворота вращающегося вала в электрические сигналы, позволяющие определить этот угол.

Линейные энкодеры преобразуют в электрические сигналы линейное перемещение. Энкодеры можно разделить на два типа:

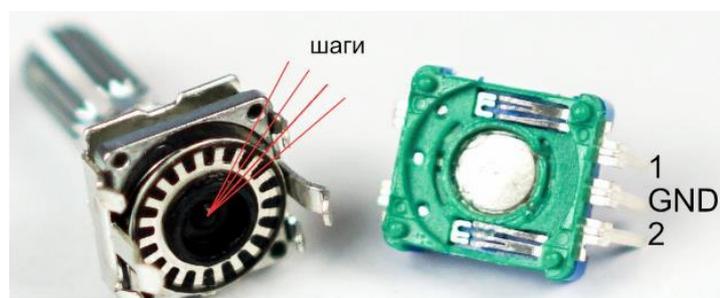
- *абсолютные*, позволяющие получить абсолютное значение угла поворота (например, переменный резистор);

- *инкрементные*, позволяющие определить угол поворота в ту или иную сторону относительно некоторого неизвестного начального положения.

Для определения абсолютного перемещения в мехатронных системах с инкрементными энкодерами применяют дополнительные датчики положения.

Большинство используемых энкодеров являются инкрементными. По принципу действия энкодеры подразделяются на:

- *энкодеры с щеточными контактами* – электромеханические датчики угла поворота или линейного перемещения, использующие скользящие контакты (щеточки) для считывания информации с кодирующего диска. Они преобразуют механическое положение в электрические сигналы, часто применяясь в простых позиционерах и устройствах ввода. Механические энкодеры содержат диск из диэлектрика или стекла с нанесёнными выпуклыми, проводящими или непрозрачными участками (Рис. 25, а).



а



б

Рисунок 25 – Конструкция механического энкодера со щеточными контактами: а – с диском из диэлектрика; б – механический энкодер мыши.

Считывание абсолютного угла поворота диска производится линейкой переключателей или контактов в случае механической схемы и линейкой оптронов в случае оптической. Выходные сигналы представляют собой код Грея, позволяющий избавиться от неоднозначности интерпретации сигнала.

Основным недостатком механического энкодера является дребезг контактов, который может приводить к неправильному подсчёту и определению направления вращения.

Резисторные энкодеры (потенциометры) – датчики угла поворота, преобразующие положение вала в изменение аналогового электрического сопротивления или напряжения, что позволяет определять точный угол поворота.

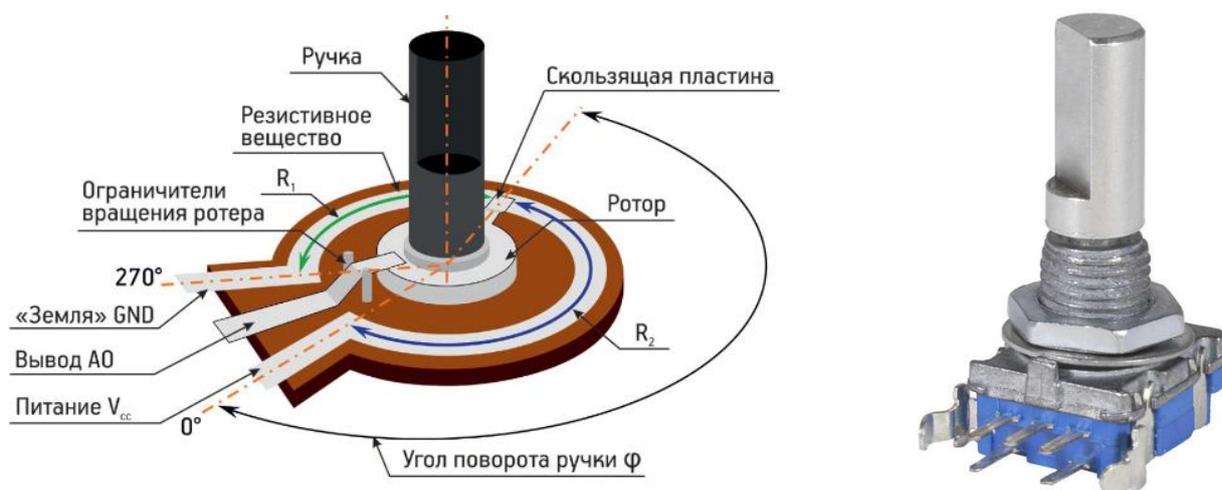


Рисунок 26 – Резисторные энкодеры

Различия энкодера и потенциометра заключаются в самом принципе действия и назначении приборов. Энкодеры (Рис. 26) применяют для измерения положения предмета в пространстве, его направления вращения и скорости, с которой он движется – в различных промышленных установках, автоматизированных системах управления, робототехнике, лабораториях, транспортных средствах. Потенциометры являются практически универсальными регуляторами – например, они используются в различной бытовой технике для изменения интенсивности звука, работы и прочего. Также широкое применение они получили в сфере измерительных приборов.

Итак, зная, чем энкодер отличается от потенциометра, можно сделать вывод, что это два совершенно разных устройства – первое управляет сопротивлением и регулирует аналоговый импульс, второй определяет угол отклонения в пространстве в цифровом значении. Они не взаимозаменяемы, так как потенциометр меняет сопротивление, а в энкодере оно остается постоянным, и для замены придется выполнить очень сложную задачу по перепрограммированию операционной системы подключаемого устройства.

Оптические энкодеры – работают по двум принципам: на просвет и на отражение. На валу оптического энкодера (Рис. 27) установлен диск с окнами

прерывания по периметру, напротив которых размещены светодиод и фототранзистор, обеспечивающие формирование выходного сигнала в виде последовательности прямоугольных импульсов с частотой, пропорциональной как количеству окон прерывания, так и скорости вращения диска/вала. Количество импульсов отображает угол поворота.

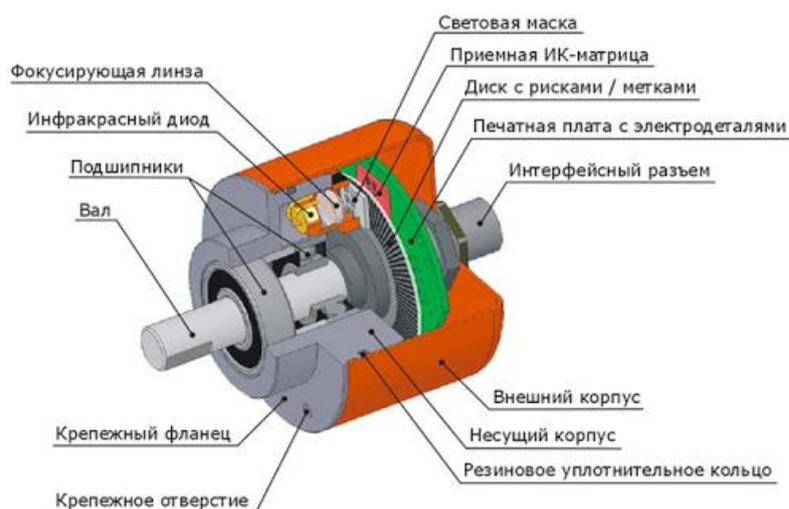


Рисунок 27 – Конструкция оптического энкодера

Оптические энкодеры получили широкое распространение в таких сферах, как: электроника, медицина и здравоохранение, авиакосмическая промышленность, наука и исследования, прецизионная обработка.

Широко распространены оптические инкрементные энкодеры на основе оптопар (фотоэлементов, см. рис. 28). Такие энкодеры как уже отмечалось выше работают по двум принципам: «на просвет» и «на отражение».

В первом случае луч от источника света, направленный на фотоэлемент, периодически прерывается диском со специальными прорезями (или прозрачным диском с непрозрачными штрихами), вращающимся на валу, во втором – источник и приемник света находятся по одну сторону непрозрачного диска с областями с разной отражающей способностью. В обоих случаях фотоприемник фиксирует переход от одной области к другой и энкодер генерирует импульс, инкрементирующий «счетчик положения».

На рисунке 28 представлен самый простой вариант реализации энкодера – одиночный. Он имеет только один фотоэлемент (одну оптопару). К недостаткам такого энкодера относятся ошибки при подсчете импульсов на границах из-за возможных ложных срабатываний и невозможность определения направления вращения.

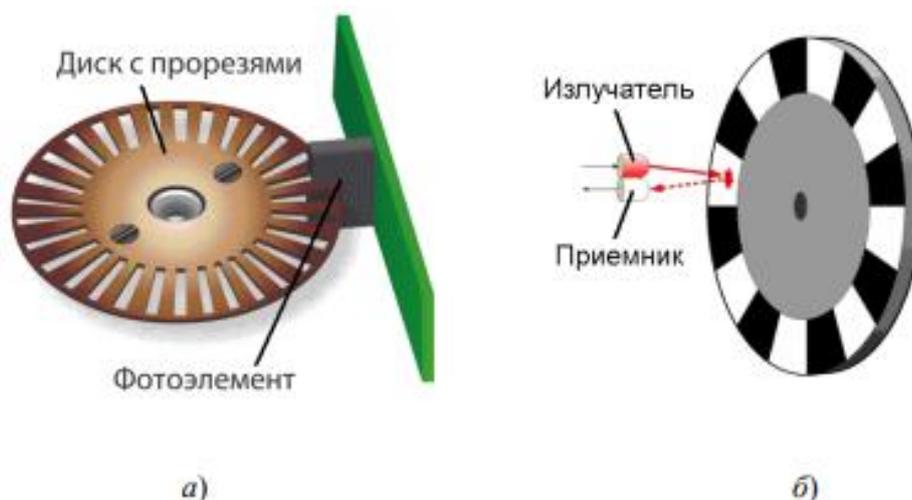


Рисунок 28 – Схемы фотоэлектрических инкрементных энкодеров: а – «на просвет»; б – «на отражение»

В сдвоенном (квадратурном) энкодере используются две оптопары, выходные сигналы которых сдвинуты по фазе на 90° . Это позволяет определять направление вращения и распознать ложные срабатывания. Электрические сигналы таких преобразователей перемещения называют фазами А и В. К этим двум фазам добавляют третью фазу (R или Z), сигнализирующую о некотором фиксированном начальном положении вала. Примером квадратурных энкодеров могут служить датчики типа E30S, ЛИР-112. Выходной сигнал квадратурных энкодеров может быть как синусоидальным, так и прямоугольным. В любом варианте реализации фазы сигналов сдвинуты на 90° . При вращении вала энкодера с прямоугольным выходным сигналом в одном направлении происходит последовательная смена сигналов $U_A = 0, U_B = 0; U_A = 1, U_B = 0; U_A = 1, U_B = 1; U_A = 0, U_B = 1$; а в другом – $U_A = 0, U_B = 0; U_A = 0, U_B = 1; U_A = 1, U_B = 1; U_A = 1, U_B = 0$, где U_A и U_B – напряжения фаз А и В, соответственно. Эти сигналы можно непосредственно подавать на входы портов микроконтроллера и использовать в соответствующем алгоритме управления.

Магнитные энкодеры (на основе датчиков Холла) – преобразуют угловое перемещение вала в электронный сигнал. Реализуется бесконтактно на основе эффекта Холла, не связано с вращением оптического прерывателя внутри датчика, и допускает обработку сигналов на скоростях до 60 тыс. об/мин.

На рисунке 29, а представленный магнитный энкодер высокоскоростное вращение внешнего вала, на котором закреплен цилиндрический постоянный магнит, воспринимается датчиком Холла, совмещенным на одном полупроводниковом кристалле с контроллером обработки сигналов. При вращении полюсов постоянного магнита над микросхемой с датчиком Холла переменный вектор магнитной индукции наводит напряжение Холла, содержащее информацию о мгновенном значении угла поворота вала. При постоянном вращении возникает синусоидальное напряжение. Электронная схема

усиливает и преобразует этот сигнал в удобную для обработки форму. На базе датчиков Холла строят инкрементальные абсолютные ШИМ-энкодеры.

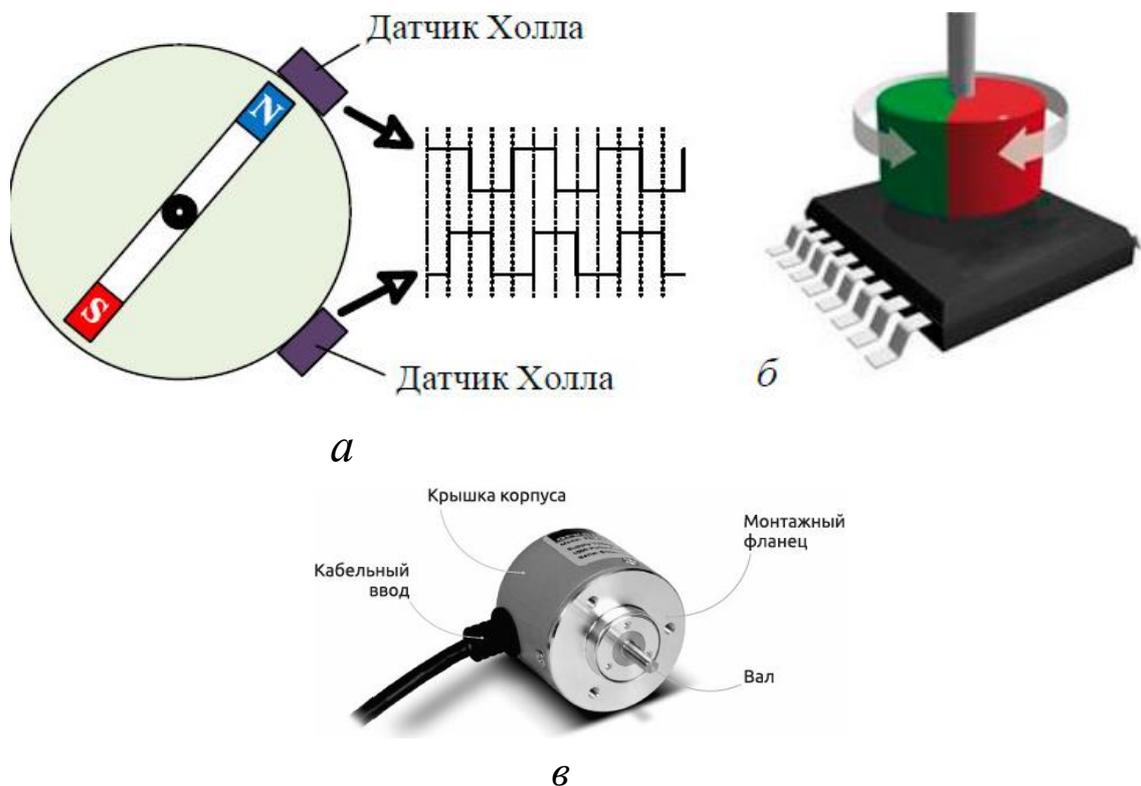


Рисунок 29 – Магнитные энкодеры (на основе датчиков Холла)

Еще более просто может работать другой тип магнитного декодера, представленного на рисунке 29, б. Система измерения угла состоит из микросхемы и небольшого магнита, размещенного на небольшом расстоянии над микросхемой.

Датчики Холла, размещенные на кристалле микросхемы, фиксируют напряженность магнитного поля магнита, где затем рассчитывается абсолютное значение угла поворота магнита. Функциональные возможности, встроенные в микросхему, позволяют запрограммировать «нулевое» положение магнита, относительно которого будет рассчитан угол, произвести диагностику и откалибровать положение магнита над микросхемой для лучшей точности. Энкодер малочувствителен к рассогласованию взаимного положения микросхемы и магнита, а также к вариациям величины воздушного зазора.

Индуктивные энкодеры – принцип их действия основан на взаимной индукции.

В датчике положения и расстояния с индукционной катушкой (Рис. 30, а) напряжение подается на первичную обмотку и индуцируется в двух вторичных обмотках, расположенных по обе стороны от первичной, через ферромагнитный сердечник. Расстояние определяется разностью напряжений на

двух вторичных обмотках, а направление – тем, совпадает ли выходное напряжение по фазе с первичным напряжением или нет.

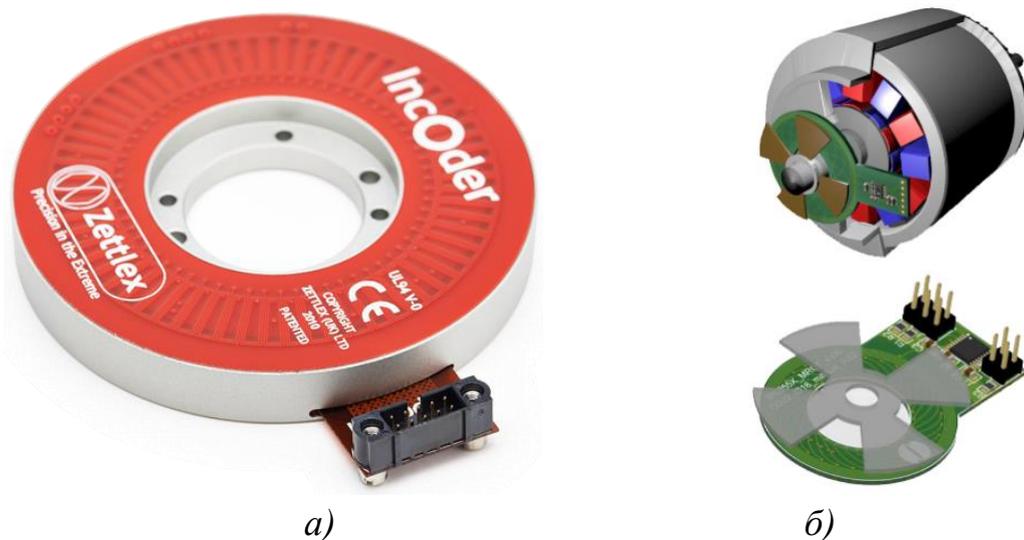


Рисунок 30 – Конструкция индуктивного энкодера: а – с индукционной катушкой; б – роторного

Роторные индуктивные энкодеры (Рис. 30, б) состоят из двух основных частей – статора (также называемого датчиком) и ротора (также называемого объектом).

Статор содержит передающую катушку и две (а иногда и больше) приемных катушек, которые нанесены на печатную плату или, в некоторых случаях, непосредственно на подложку статора. Приемные катушки расположены таким образом, чтобы генерировать синусоидальные и косинусоидальные волны. Во многих конструкциях на статоре также размещается электронная схема для обработки сигнала. Ротор, или мишень, является пассивным элементом и изготавливается либо из ферромагнитного материала, либо из подложки, содержащей слой или узоры из проводящего материала, например меди.

При подаче напряжения на передающую катушку на статоре, или датчике, создается электромагнитное поле. Когда ротор, или объект, проходит над датчиком, на поверхности объекта возникают вихревые токи. Эти вихревые токи создают противодействующее поле, которое уменьшает плотность магнитного потока между датчиком и объектом, в результате чего в приемных катушках датчика возникает напряжение. Амплитуда и фаза напряжения в приемных катушках меняются при движении объекта, и по этим изменениям можно определить его положение.

Индуктивные энкодеры также выпускаются в линейном исполнении. В этом случае мишенью является линейная шкала с ферромагнитными (или электропроводящими) решетками или полосами. Датчик (также называемый считывающей головкой) содержит передающую и приемную катушки, а так-

же электронику для обработки сигнала. Когда считывающая головка движется вдоль шкалы, решетки на шкале вызывают колебания напряжения, индуцируемого в приемных катушках, и эти колебания указывают на линейное положение датчика.

Емкостные энкодеры – принцип работы основан на оценке изменений электрического поля, происходящих при вращении кодового диска специальной формы. Изменение электрического поля оценивается по изменению ёмкости конденсаторов, образованных обкладками на неподвижной части энкодера и вращающимся кодовым диском (Рис. 31).

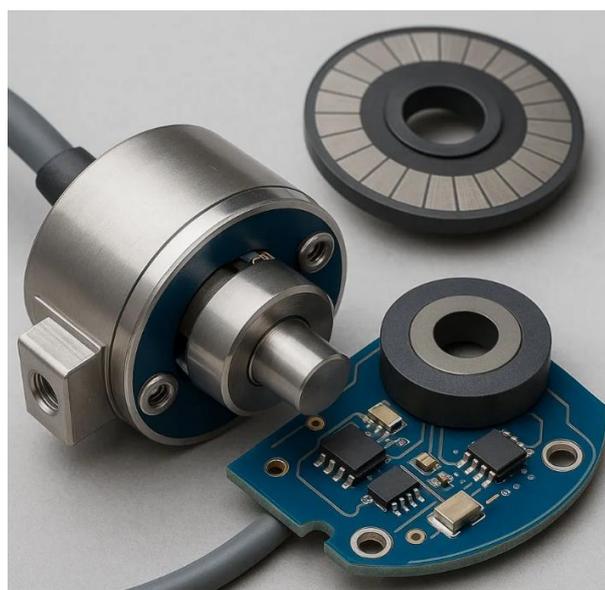


Рисунок 31 – Емкостные энкодеры

Основной принцип работы емкостных энкодеров заключается в том, что они фиксируют изменения емкости с помощью высокочастотного опорного сигнала. Для этого используются три основные части: неподвижный передатчик, ротор и неподвижный приемник (Рис. 32). (Емкостные энкодеры также могут быть выполнены в «двухкомпонентной» конфигурации с ротором и комбинированным передатчиком/приемником.) (Рис. 33). На роторе выгравирован синусоидальный узор, который при вращении предсказуемым образом модулирует высокочастотный сигнал передатчика.

Диск приемника считывает модуляции, а встроенная электроника – проприетарная интегральная схема специального назначения – преобразует их в импульсы вращательного движения. Электроника также генерирует квадратурные сигналы для инкрементного кодирования с разрешением от 48 до 2048 импульсов на оборот.

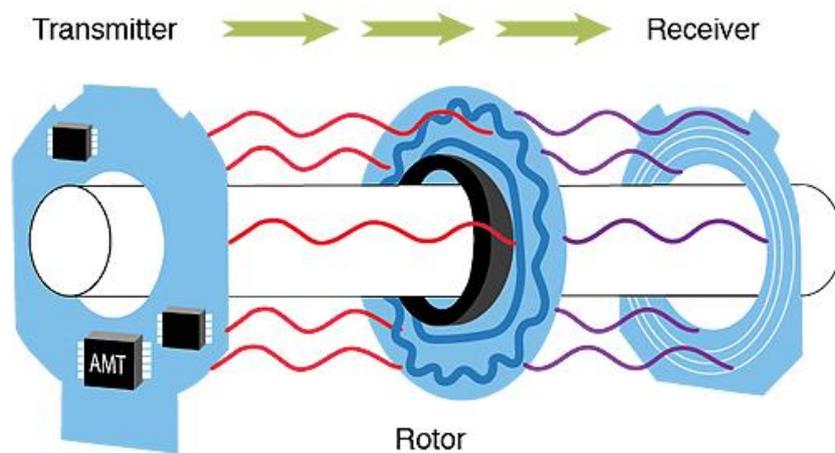


Рисунок 32 – Принцип работы емкостных энкодеров: Transmitter – передатчик; Receiver – приемник; Rotor – ротор

Принцип работы емкостных энкодеров заключается в передаче высокочастотного сигнала через ротор с синусоидальным рисунком. При движении ротора этот рисунок предсказуемым образом модулирует сигнал. Приемник считывает эти модуляции, а бортовая электроника преобразует их в значения угла поворота

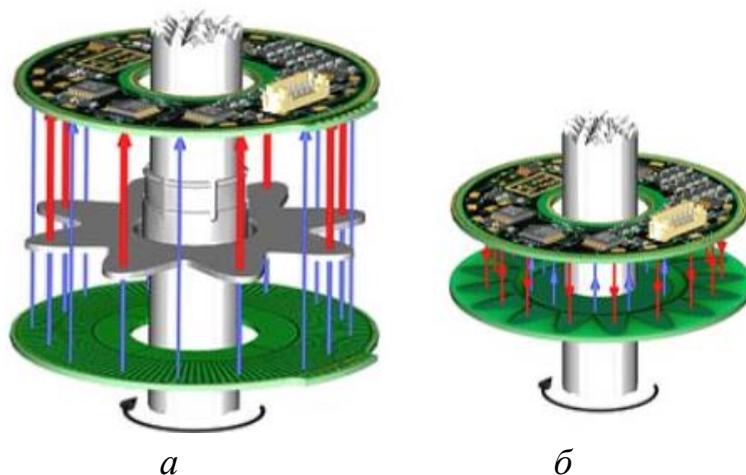


Рисунок 33 – Емкостные энкодеры: а – трехкомпонентный емкостной со стационарным передатчиком, ротором и стационарным приемником; б – двухкомпонентный с комбинированным передатчиком/приемником и ротором

Кроме энкодеров применяются и другие преобразователи вращательного движения в электрические сигналы.

Это, например, тахогенераторы, преобразующие частоту вращения вала в пропорциональное выходное напряжение. Их применение неоправданно ввиду присущей им мультипликативной погрешности, которая равна

нулю при использовании энкодеров. Используются также *сельсины* и *вращающиеся трансформаторы*.

Сельсины – это индукционные электрические машины (Рис. 34), элементы синхронной связи, обеспечивающие одновременный поворот или одновременное вращение нескольких, механически не связанных между собой валов.



Рисунок 34 – Сельсин, общий вид

Они позволяют при постоянном напряжении на входе получать на выходных обмотках систему напряжений, амплитуда и фаза которых определяются угловым положением ротора (сельсины-датчики), или же, наоборот, такую систему напряжений преобразовать в соответствующее ей угловое положение ротора (сельсины-приемники индикаторные) или в напряжение, фаза и амплитуда которого является функцией системы выходных напряжений и угла поворота ротора (сельсины-приемники трансформаторные).

Устройство сельсинов. Однофазные сельсины, по существу, являются асинхронными машинами малой мощности. Они бывают явнополюсными (индикаторные) и неявнополюсными (трансформаторные). В явнополюсных сельсинах однофазная обмотка возбуждения располагается на явно выраженных полюсах ротора или статора. Обмотка синхронизации всегда выполняется распределенной и располагается в пазах статора или ротора; фазы её соединяются в звезду.

Сельсины выполняются двухполюсными, для того, чтобы обеспечить самосинхронизацию в пределах одного оборота.

Число контактных колец и щеток зависит от места расположения обмоток: сельсины с обмоткой возбуждения на роторе имеют два контактных кольца; с обмоткой возбуждения на статоре – три контактных кольца. В некоторых типах сельсинов применяются электрические или механические

демпферы, обеспечивающие быстрое затухание собственных колебаний ротора при переходе его из одного положения в другое.

Для повышения надежности в настоящее время широко применяются бесконтактные сельсины с однофазной обмоткой возбуждения и трехфазной обмоткой синхронизации, расположенными на статоре, вследствие чего отпадает необходимость в скользящих контактах. Недостатком бесконтактных сельсинов является худшее использование материалов из-за больших потоков рассеяния и тока холостого хода.

При одинаковых синхронизирующих моментах вес бесконтактного сельсина примерно в 1,5 раза больше, чем контактного.

Сельсины по функциональному назначению разделяются на:

- сельсины-датчики (СД). Реализация технологического процесса предполагает использование различного оборудования. В некоторых случаях надо добиться синхронного и синфазного вращения осей различных устройств.

Иногда по каким-то причинам механическое соединение не представляется возможным. Тогда вместо муфты используют сельсин – специальный датчик, благодаря которому можно добиться требуемой синхронизации. Он нередко входит в состав специальных систем, нуждающихся в повороте на некоторый угол на расстоянии. Сельсин работает в режиме приемника и передающего элемента.

Сельсины классифицируются на:

- сельсины-датчики дифференциальные (СДД);
- сельсины-приемники индикаторные (СПИ);
- сельсины-приемники дифференциальные индикаторные (СПДИ);
- сельсины-приемники трансформаторные (СПТ).

СД и СПТ могут быть одноканальными с двухполюсными обмотками синхронизации, и двухканальными – с двухполюсными (грубый канал) и многополюсными (точный канал) обмотками синхронизации.

Существуют также двойные СПИ, представляющие собой механическое соединение двух СПИ в одном корпусе.

По характеру токосъема (токоподвода) сельсины могут быть контактными и бесконтактными.

Вращающиеся трансформаторы предназначены для получения переменного напряжения, находящегося в функциональной зависимости от угла поворота ротора и по сути являются одним из видов энкодеров, работают на основе принципа электромагнитной индукции (Рис. 35).

Предназначены для работы в электромеханических счетно-решающих устройствах, следящих системах, а также в качестве первичного датчика в цифровых преобразователях.



Рисунок 35 – Вращающийся трансформатор (ВТ-4Б), общий вид

Сначала нам нужно понять, что вращающийся трансформатор состоит из двух основных частей: статора и ротора. Статор – это стационарная часть трансформатора, содержащая первичную обмотку, которая подключается к источнику переменного тока. Ротор – это вращающаяся часть, содержащая вторичную обмотку.

Когда через первичную обмотку пропускают переменный ток, создается магнитное поле. Это магнитное поле, в свою очередь, индуцирует ток во вторичной обмотке, которая находится в роторе.

Следует отметить, что между статором и ротором нет прямого электрического контакта. Вместо этого энергия передается через воздушный зазор между этими двумя компонентами с помощью вращающегося магнитного поля, создаваемого статором.

Эффективность передачи энергии зависит от многих факторов, включая частоту переменного тока, число витков в обмотках, расстояние между обмотками и размер воздушного зазора. Благодаря этому, с помощью вращающегося трансформатора можно увеличить или уменьшить напряжение, в зависимости от требований конкретной электрической системы.

В общем, работа вращающегося трансформатора основана на использовании принципа электромагнитной индукции для передачи электрической энергии между двумя или более обмотками.

Тахогенераторы – предназначены для работы в качестве датчиков в системах автоматического регулирования частоты вращения приводов различных стационарных установок (Рис. 36). Они могут быть использованы в качестве измерителей частоты вращения, а также в системах автоматического управления, контроля и диагностики, с применением микропроцессорной техники.

Существует несколько типов тахогенераторов, которые отличаются конструкцией, принципом работы и техническими параметрами.



Рисунок 36 – Тахогенератор, общий вид

Но все они выполняют одну и ту же задачу: регистрировать реальную скорость вращения и передавать данные дальше для контроля и регулирования.

Тахогенератор – это электромеханический преобразователь, который вырабатывает сигнал, обычно электрический. Он может быть аналоговым или цифровым. Аналоговый сигнал прямо пропорционален скорости вращения вала. Цифровой удобнее для работы и кодируется в том формате, который нужен потребителю.

Существуют различные типы тахогенераторов, но их базовая конструкция и принцип действия схожи.

Тахогенератор крепят непосредственно к валу (или ротору), скорость вращения которого нужно контролировать. Это может быть отдельный вал самого устройства или общий с основным механизмом, если оно сконструировано как часть более крупной системы.

Для генерирования электрического сигнала нужно магнитное поле: либо постоянные магниты, закрепленные на статической части (статоре) или на самом роторе, либо магнитопроводящая конструкция, которая создает необходимое распределение поля. При вращении в магнитном поле в обмотках возникает электродвижущая сила (ЭДС). Именно эта ЭДС и служит «сырым» сигналом, который будет использоваться для контроля скорости. В зависимости от расположения обмоток (на роторе или на статоре), а также их количества и конфигурации, меняется форма и амплитуда выходного сигнала.

Если обмотки располагают на вращающемся роторе, для вывода электросигналов требуется контактная группа. Это могут быть:

- кольца – при кольцевых обмотках;
- коллектор (сегментированный контакт) в более сложных конструкциях;
- бесконтактные решения, например, оптическая или магнитная передача сигнала, однако это уже специфические реализации.

Корпус тахогенератора защищает внутренние компоненты от загрязнений, влаги и механических повреждений. В нем же располагают подшипники вала и выводные клеммы или разъемы для подключения к внешним системам.

В процессе работы вал тахогенератора вращается с той же скоростью, что и механизм, к которому он прикреплен. Благодаря этому в обмотках или системе датчиков формируется напряжение, величина которого пропорциональна числу оборотов в единицу времени, то есть скорости вращения. В дальнейшем это напряжение может усиливать, фильтровать или оцифровывать внешняя аппаратура для мониторинга и управления.

Контрольные вопросы

1. Механическая характеристика электродвигателя – это зависимость ...

- тока ротора от тока статора;
- частоты вращения ротора от момента на его валу;
- угловой скорости ротора от момента на его валу;
- тока ротора от момента на его валу.

2. Жесткостью механической характеристики называется отношение ...

- приращения момента на валу ротора к приращению угловой скорости;
- момента на валу ротора к угловой скорости;
- мощности снимаемой с вала двигателя к току статора;
- момента на валу ротора к току ротора.

3. Абсолютно жесткой механической характеристикой обладают...

- двигатели постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения;
- двигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения;
- двигатели постоянного тока со смешанной обмоткой возбуждения;
- синхронные электродвигатели.

4. Жесткой механической характеристикой обладают...

- двигатели постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения;
- двигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения;
- трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором;
- синхронные электродвигатели.

5. Мягкой механической характеристикой обладают...

- двигатели постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения;
- двигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения;

- трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором;

- синхронные электродвигатели.

6. Абсолютно мягкой механической характеристикой обладают...

- электродвигатели постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения;

- электродвигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения;

- электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока;

- синхронные электродвигатели.

7. Выберите наиболее важные характеристики исполнительных электродвигателей.

- экономичность;

- отсутствие самохода – самоторможение двигателя при снятии сигнала управления;

- малоинерционность;

- большие пусковые токи.

8. Механические характеристики исполнительных двигателей должны быть ...

- линейными,

- нелинейными;

- линейность или нелинейность не оказывают влияние на работу исполнительных электродвигателей;

- нелинейными на пусковом участке.

9. Каким должен быть пусковой момент исполнительного электродвигателя?

- минимальным;

- максимальным;

- он не оказывает влияние на работу исполнительных электродвигателей;

- равным, половине номинального.

10. Выберите основной недостаток исполнительных двигателей постоянного тока.

- невозможность плавного регулирования частоты вращения якоря;

- наличие обмоток возбуждения;

- наличие коллектора и щеток;

- невозможность получения частот вращения якоря свыше 3000 об/мин.

11. Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле статора называется ...

- реакцией якоря и является положительным эффектом;
- реакцией статора и является положительным эффектом.
- реакцией якоря и является негативным эффектом;
- реакцией статора и является негативным эффектом.

12. У двигателей постоянного тока, с какой обмоткой возбуждения не допускается работа под нагрузкой, составляющей менее 25% от номинальной?

- параллельной;
- последовательной;
- независимой;
- смешанной.

13. Как называются двигатели постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения?

- шунтовыми;
- сириесными;
- компаудными;
- рекуперативными.

14. Как называются двигатели постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения?

- шунтовыми;
- компаудными;
- рекуперативными.
- сириесными;

15. Как называются двигатели постоянного тока со смешанной обмоткой возбуждения?

- шунтовыми;
- компаудными;
- рекуперативными.
- сириесными;

16. Какой величины может достигать максимальная частота вращения двигателя постоянного тока?

- до 3000 об/мин;
- до 30000 об/мин;
- до 15000 об/мин;
- до 1500 об/мин.

17. Что означает свойство обратимости электрических машин?

- вал якоря может вращаться по часовой стрелке и против нее;
- возможность реверса на любых режимах работы;

- одна и та же машина может выполнять функцию генератора электрической энергии и электродвигателя;
- поле статора вращается в сторону противоположную вращению якоря.

18. Вентильный двигатель это ...

- двигатель постоянного тока без коллектора и щеток;
- двигатель постоянного тока со встроенным выпрямителем тока;
- двигатель постоянного тока с «вентильным эффектом»;
- двигатель постоянного тока со встроенной системой вентиляции коллекторного пространства.

19. Механические характеристики вентильных двигателей одно-типны механическим характеристикам двигателей постоянного тока ...

- смешанного возбуждения;
- последовательного возбуждения;
- параллельного возбуждения;
- независимого возбуждения.

20. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами это двигатели где ...

- обмотка якоря заменена на постоянные магниты.
- постоянные магниты используются для устранения «самохода» якоря;
- обмотка возбуждения заменена на постоянные магниты;
- постоянные магниты усиливают поле создаваемое обмоткой возбуждения.

21. Прямой пуск двигателя постоянного тока возможен для двигателей постоянного тока ...

- с параллельной обмоткой возбуждения;
- малой мощностью и большим сопротивлением якоря;
- с последовательной обмоткой возбуждения;
- с мощностью более 5 кВт.

22. Какой способ электрического торможения двигателей постоянного тока позволяет регулировать интенсивность торможения?

- динамический;
- рекуперативный;
- противовключением.
- динамический, рекуперативный, противовключением.

23. Как повлияет увеличение сопротивления в цепи якоря на частоту его вращения?

- частота вращения увеличится;
- частота вращения не изменится;
- частота вращения уменьшится;
- сопротивление не влияет на частоту вращения якоря.

24. Выберите наиболее экономичный способ регулирования частоты вращения якоря двигателя постоянного тока.

- изменение сопротивления в цепи якоря;
- изменение напряжения питающей сети;
- изменение сопротивления в цепи обмотки возбуждения;
- изменение сопротивления в цепи якоря и обмотки возбуждения.

25. Какое устройство автоматики называют энкодером?

- устройство, преобразующее линейное или угловое перемещение в последовательность сигналов, позволяющих определить величину перемещения;
- устройство, для усиления сигнала поступающего с датчика угловых перемещений;
- устройство, для ограничения углового перемещения исполнительного механизма;
- устройство, для формирования аналогового сигнала поступающего на исполнительный механизм.

26. Тахогенераторы это устройства ...

- преобразующие частоту вращения вала в пропорциональный ток на выходе;
- преобразующие частоту вращения вала в пропорциональное выходное напряжение;
- преобразующие частоту вращения вала в сопротивление обмотки якоря;
- преобразующие частоту вращения вала в сопротивление обмотки возбуждения.

27. Однофазные сельсины, по существу, являются ...

- синхронными машинами большой мощности;
- асинхронными машинами большой мощности;
- синхронными машинами малой мощности;
- асинхронными машинами малой мощности.

28. Вращающиеся трансформаторы работают на основе принципа ...

- оценки изменения величины электрического поля;
- эффекта Холла;
- отражения оптического луча;
- электромагнитной индукции.

29. Сервопривод – это ...

- привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения;
- привод с управлением без обратной связи, для управления параметрами движения;

- привод позволяющий управлять параметрами движения, с допустимыми технологическими погрешностями;
- привод со встроенными энкодерами.

30. Оптические энкодеры – работают по принципам ...

- на просвет оптического луча;
- на отражение оптического луча;
- на преломление оптического луча;
- на отражение оптического луча.