

Электродвигатели и нагрузки

- Основы теории электрических машин и электропривода
- Режимы работы электродвигателей и типы нагрузки

3.1	Трёхфазные асинхронные двигатели	38
3.2	Однофазные двигатели	42
3.3	Синхронные двигатели	43
3.4	Двигатели постоянного тока	45
3.5	Работа асинхронных двигателей	47
3.6	Сравнение электродвигателей	50
3.7	Типы нагрузок	51
3.8	Клапаны и электрические винтовые механизмы	56

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

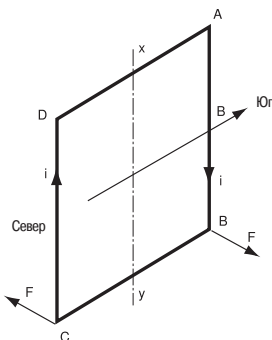
12

C

Раздел посвящён физическим и электрическим свойствам двигателей. Детально рассматривается принцип действия основных типов двигателей.

Кратко объясняются принципы энергоснабжения, запуска и регулирования скорости двигателей. Для более глубокого ознакомления необходимо обратиться к специальной литературе.

3.1 Трёхфазные асинхронные двигатели



↑ Рис. 1 Индуцированный ток генерируется в короткозамкнутой рамке

Первый раздел посвящён 3-фазным асинхронным двигателям, как наиболее часто используемым для привода механизмов. Эти двигатели имеют ряд преимуществ, которые делают их выбор очевидным для многих применений: они стандартизированы, надежны, просты в управлении и обслуживании и экономически выгодны.

■ Принцип действия

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на создании индуцированного тока в проводнике при пересечении силовых линий магнитного поля. Отсюда и название – «индукционный двигатель». Взаимодействие индуцированного тока с магнитным полем создает движущую силу на роторе двигателя.

Рассмотрим короткозамкнутую рамку ABCD, находящуюся в магнитном поле с индукцией B , вращающемся вокруг оси xy (⇒ Рис. 1).

Если вращать короткозамкнутую рамку, например, по часовой стрелке, внутри рамки образуется изменяющийся магнитный поток и возникает электродвижущая сила, которая генерирует индуцированный ток (Закон Фарадея).

Согласно закону Ленца направление тока таково, что его электромагнитное действие противоположно полю, индуцирующему ток в витке. Поэтому, на каждый проводник в изменяющемся магнитном поле действует сила Лоренца F , направленная в сторону, противоположную направлению его собственного перемещения относительно силовых линий индуцирующего поля.

На Рис. 2 показан простой способ определения направления силы F , действующей на проводник, с использованием правила правой руки (воздействие поля на ток).

Большой палец показывает направление силовых линий индуцирующего поля, указательный палец указывает на направление силы, действующей на проводник. Средний палец устанавливается в направлении индуцированного тока. Поэтому на замкнутую рамку воздействует момент, который вращает ее в том же направлении, что и поле, индуцирующее ток, так называемое вращающееся поле. Рамка вращается, и результирующий электромагнитный момент уравновешивается моментом нагрузки.



↑ Рис. 2 Правило «правой руки» для нахождения направления действия силы

■ Образование вращающегося поля

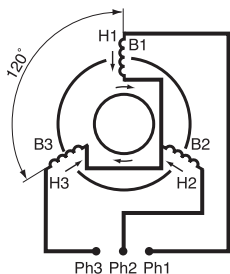
На статоре трехфазного двигателя расположены три обмотки, которые смещены в пространстве по отношению друг к другу на 120 градусов (⇒ Рис. 3).

Каждая статорная обмотка питается от одной из фаз 3-фазного напряжения питающей сети. Через обмотки протекают переменные токи с таким же электрическим сдвигом по фазе, каждый из которых создает переменное магнитное поле, изменяющееся по синусоидальному закону. Это поле всегда действует вдоль одной оси и достигает максимальной величины при прохождении током в обмотке максимального значения.

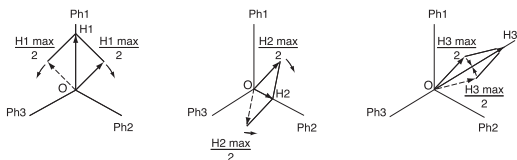
Поле, образуемое каждой обмоткой, можно представить как сумму двух полей, вращающихся в противоположных направлениях, амплитуда каждого из которых постоянна и равна половине амплитуды исходного поля. Для момента времени t_1 распределение векторов полей, создаваемых обмотками представлено на рис. 4. Результирующее поле, образуемое каждой обмоткой, может быть представлено следующим образом:

- амплитуда H_1 уменьшается, оба вектора движутся от оси OH_1 ;
- амплитуда H_2 увеличивается, оба вектора движутся к оси OH_2 ;
- амплитуда H_3 увеличивается, оба вектора движутся к оси OH_3 .

Вектор потока H_3 обмотки Ph 3 отрицателен, поэтому поле обмотки изменяется в противоположном направлении.



↑ Рис. 3 Общий принцип устройства трехфазного асинхронного двигателя



↑ Рис. 4 Поля, генерируемые тремя фазами

Если совместить 3 диаграммы, то можно увидеть:

- три поля, вращающиеся против часовой стрелки, смещены на 120° и нейтрализуют друг друга;
- три поля, вращающиеся по часовой стрелке, накладываются и объединяются во вращающееся поле с постоянной амплитудой $3N\sin\alpha/2$; это поле с одной парой полюсов;
- результирующий вектор поля совершает оборот за один период напряжения источника питания. Его скорость зависит от частоты силовой сети (f) и числа пар полюсов (p). Это так называемая «синхронная скорость».

■ Скольжение

Вращающий момент в двигателе может возникнуть только в том случае, если по обмотке ротора протекает ток. Это возможно только тогда, когда проводники обмотки ротора пересекают силовые линии вращающегося магнитного поля обмотки статора. Поэтому скорости вращения магнитного поля (статора) и проводников (ротора) не могут быть одинаковыми. Вот почему двигатель, работающий по описанному выше принципу, называется асинхронным. Разница между синхронной скоростью (Ns) и скоростью вращения ротора (N) называется скольжением (s), и выражается в процентах от синхронной скорости:

$$s = [(Ns - N) / Ns] \times 100$$

В процессе работы частота тока ротора получается умножением частоты сети на скольжение. Когда двигатель начинает работать, частота тока ротора максимальна и равна частоте тока статора. При разгоне частота тока ротора постепенно уменьшается: $f_2 = f_1 \cdot s$.

В установившемся режиме скольжение определяется нагрузкой двигателя. С увеличением нагрузки или уменьшением величины питающего напряжения скольжение увеличивается.

■ Синхронная скорость

Синхронная скорость 3-фазных асинхронных двигателей пропорциональна частоте источника питания и обратно пропорциональна числу пар полюсов в статоре.

Пример: $Ns = 60 f/p$,

где: Ns: синхронная скорость в оборотах в минуту

f: частота в Гц

p: число пар полюсов

Таблица на рис. 5 показывает значение синхронной скорости в зависимости от числа полюсов для промышленной частоты 50, 60 и 100 Гц.

На практике далеко не всегда удается увеличить синхронную частоту вращения асинхронного двигателя путем увеличения частоты питающей сети, превышающей его номинальные характеристики, даже при номинальном напряжении двигателя. Прежде всего должен приниматься во внимание запас по механическим и электрическим параметрам двигателя.

Как уже отмечалось, из-за скольжения скорость вращения асинхронного двигателя немного ниже, чем синхронные скорости, которые приведены в таблице.

□ Конструкция

3-фазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором состоит из двух основных частей: статора и ротора.

□ Статор

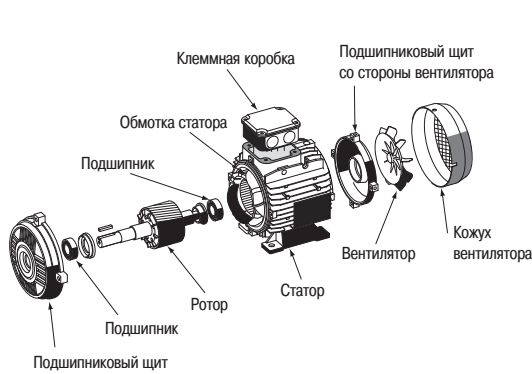
Статор - неподвижная часть двигателя. В корпусе, отлитом из чугуна или лёгкого сплава, размещено кольцо тонких (толщиной порядка 0,5 мм) пластин из электротехнической стали. Пластины изолированы друг от друга лаком или оксидом, образующейся при отжиге. Такая структура строения статора препятствует протеканию токов по статорному железу и уменьшает потери на гистерезис и вихревые токи.

Кол-во полюсов	Частота вращения об/мин		
	50 Гц	60 Гц	100 Гц
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

↑ Рис. 5

Синхронные скорости в зависимости от количества полюсов и частоты питающей сети

В пластинах имеются пазы для укладки обмоток статора, вырабатывающих вращающееся поле (три обмотки для 3-фазного двигателя). Каждая обмотка состоит из нескольких катушек. Способ соединения обмоток определяет количество пар полюсов двигателя и, следовательно, скорость вращения поля статора двигателя.



↑ **Рис. 6** Конструкция двигателя с короткозамкнутым ротором

□ Ротор

Это подвижная часть двигателя. Ротор представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали изолированных друг от друга аналогично статору. Он механически закреплен на валу двигателя. На поверхности ротора имеются продольные пазы для обмотки. Листы сердечника ротора специально не изолируют, так как в большинстве случаев достаточно изоляции от окалина. В зависимости от технологии, используемой при изготовлении ротора асинхронные двигатели подразделяются на двигатели с короткозамкнутым ротором (беличья клетка) и двигатели с контактными кольцами (фазный ротор).

■ Типы ротора

□ Роторы с беличьей клеткой

Существует несколько типов роторов с беличьей клеткой. Конструкция асинхронного двигателя с беличьей клеткой показана на **рис. 6**.

Рассмотрим их в порядке от наименее распространенных к наиболее часто применяемым.

Имеется три типа короткозамкнутого ротора: с обычной клеткой, с двойной клеткой и с глубокой клеткой

• Резистивный ротор

Резистивный ротор обычно исполняется как ротор с обычной клеткой (см. описание ротора с обычной клеткой ниже). Обмотка в этом случае закорачивается с двух сторон кольцами, имеющими большое сопротивление (специальные сплавы, уменьшенное сечение, может быть нержавеющая сталь). Эти двигатели имеют повышенное скольжение при номинальном моменте, однако при этом пусковой момент у них высокий, а пусковой ток – низкий (⇒ **Рис. 7**).

КПД таких двигателей низок из-за потерь в роторе. Они имеют круто падающую механическую характеристику, при которой скольжение изменяется практически пропорционально моменту и могут использоваться для следующих приводов:

- несколько соединенных механически электродвигателей (характеристика позволяет пропорционально распределить нагрузку); применяются на рольгангах и в крановых приводах;
- шахтные подъемники, приводимые в действие двигателями Alquist (см. примечание);
- грузоподъемные устройства или конвейеры, для которых нужны высокий начальный вращающий момент с ограниченным пусковым током.

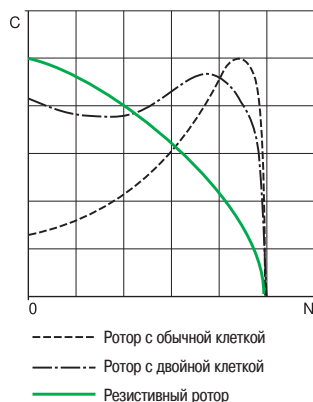
Частотой вращения можно управлять, изменяя только питающее напряжение. Сейчас для этого обычно используются преобразователи частоты. Большинство двигателей имеют естественное охлаждение, но для двигателей с резистивным ротором обычно требуется специальное охлаждение (от внешнего вентилятора).

Примечание: эти асинхронные двигатели с форсированным охлаждением и высоким скольжением используются с регуляторами скорости, их ток опрокидывания близок к номинальному току. Они имеют очень высокое отношение «момент/скорость». При наличии управляемого источника питания это отношение может быть изменено для приведения момента двигателя в соответствие с моментом нагрузки.

• Ротор с обычной клеткой

В пазы ротора уложены голые медные или алюминиевые стержни, концы которых замкнуты накоротко на металлическое кольцо. Обмотка образует клетку, которая благодаря сходству с беличьим колесом, называется «беличьей клеткой». Проводники, уложенные в пазы двигателя, имеют наклон относительно оси вала, что обеспечивает равномерность вращающего момента. Клетку ротора обычно полностью отливают под давлением из алюминия (только очень большие двигатели имеют проводники, вставленные в пазы). Одновременно отливают ребра охлаждения.

У этих двигателей очень низкий пусковой момент, а потребляемый ток в момент включения значительно выше, чем номинальный (⇒ **Рис. 7**).



↑ **Рис. 7** Механическая характеристика двигателя с короткозамкнутым ротором (при номинальном напряжении)

С другой стороны, у них низкое скольжение при номинальном вращающем моменте. Они применяются главным образом в общепромышленных приводах большой мощности для повышения эффективности установок, приводя в действие насосы и вентиляторы. При использовании в комбинации с преобразователями частоты они обеспечивают лучшее решение проблем пускового тока и пускового момента.

• Ротор с двойной клеткой

Ротор имеет две концентрические клетки, одна из которых внешняя с малым сечением проводников с довольно высоким сопротивлением, и другая - внутренняя с большим сечением и более низким сопротивлением.

Смысл применения двух обмоток заключается в следующем. В начале пуска, когда $f_2=f_1$, внутренняя обмотка охватывается магнитными линиями в гораздо большей степени, нежели внешняя. Поэтому индуктивное сопротивление внутренней обмотки гораздо больше, чем внешней, и при $f_2=f_1$ весь ток ротора вытесняется к поверхности. При этом, поскольку омическое сопротивление внешней обмотки высокое, пусковой момент становится большим, а пусковой ток статорной обмотки уменьшается (\Rightarrow Рис. 7).

По мере увеличения скорости частота тока ротора $f_2=f_1 \cdot s$ уменьшается, прекращается явление вытеснения тока и в работу вступает внутренняя обмотка с более низким омическим сопротивлением.

При прочих равных условиях скольжение двигателя, имеющего ротор с двойной клеткой, несколько больше, чем у двигателя с ротором с обычной клеткой.

• Ротор с глубоким пазом

Это стандартный ротор. Его проводники размещаются в трапециевидных пазах, короткая сторона которых расположена на наружной поверхности ротора. Принцип работы такой же, как и у ротора с двойной клеткой, с той лишь разницей, что используются не две различные обмотки, а одна. При этом в момент пуска за счет эффекта вытеснения работает не все сечение провода, а его небольшая часть. Соответственно, пусковой момент становится больше, а пусковой ток – меньше. При этом при работе с номинальной нагрузкой скольжение практически такое же, как у двигателя с обычной роторной клеткой.

□ Фазный ротор (ротор с контактными кольцами)

На роторе уложена трехфазная обмотка, аналогично статорной (\Rightarrow Рис. 8).

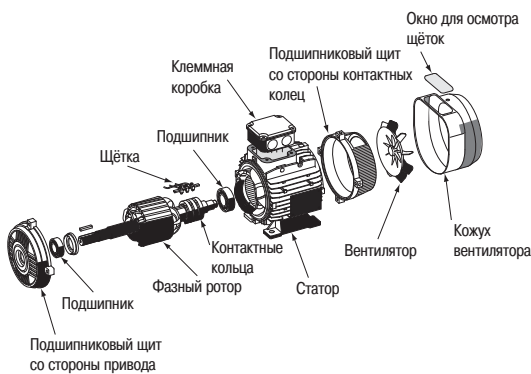
Один конец каждой обмотки соединён с общей точкой (подключение звездой). Свободные концы могут быть соединены с центробежной муфтой или с тремя изолированными медными кольцами на валу ротора.

По этим кольцам скользят графитовые щетки, связанные с пусковым устройством.

В зависимости от номиналов резисторов в цепи ротора двигатель может достичь пускового момента, в 2,5 раза превышающего номинальный вращающий момент.

Пусковой ток фактически пропорционален вращающему моменту на валу двигателя.

Это решение уступает стандартным двигателям с короткозамкнутым ротором с электронными устройствами регулирования. Последние проще в обслуживании (исключены замена износившихся щеток, обслуживание и регулировка резисторов), отсутствует падение мощности на резисторах, что значительно улучшает эффективность оборудования.



↑ Рис. 8

Конструкция двигателя с фазным ротором

3.2 Однофазные двигатели

Однофазный двигатель, хотя и реже используется в промышленности, чем трёхфазный, однако довольно широко применяется в мало мощных устройствах и в системах с однофазным напряжением 230 В.

■ Однофазные двигатели с короткозамкнутым ротором

При одинаковой мощности они имеют большие габариты, чем 3-фазные двигатели.

Их КПД и коэффициент мощности намного ниже, чем у 3-фазного двигателя и значительно меняются в зависимости от типоразмера двигателя и от завода-изготовителя.

В Европе однофазный двигатель мало используется в промышленности, в отличие от США, где встречаются двигатели мощностью до 10 кВт.

Хотя короткозамкнутый однофазный двигатель применяется достаточно редко, он может управляться преобразователем частоты, но лишь немногие изготовители предоставляют такую возможность.

□ Структура

Как и 3-фазный двигатель, однофазный двигатель состоит из двух частей: статора и ротора.

• Статор

Статор имеет чётное количество полюсов и его обмотки подключены к силовой сети.

• Ротор

Обычно короткозамкнутый (беличья клетка).

□ Принцип действия

Возьмём статор с двумя обмотками, подключенными выводами L1 и N к силовой сети (⇒ Рис. 9).

Однофазный переменный ток формирует переменное поле H в роторе, являющееся суммой полей обмоток $H1$ и $H2$ с одинаковыми амплитудами и вращающимися в противоположных направлениях.

В состоянии покоя при подключении статора к источнику электроэнергии эти поля одинаковым образом пересекают обмотку ротора и, следовательно, формируют два одинаковых, но противоположных по направлению вращающих момента.

Двигатель не может начать вращение.

Механический импульс на роторе вызывает неравенство в скольжении. Один из вращающих моментов уменьшается, в то время как другой - увеличивается. Суммарный вращающий момент запускает двигатель в направлении, в котором был приложен механический импульс.

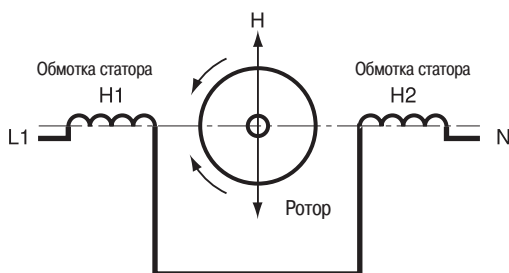
Для решения проблемы запуска в статор дополнительно встраивается другая обмотка, смещённая относительно основной на 90 градусов.

Во вспомогательную обмотку встроено устройство сдвига фаз (конденсатор или индуктивность).

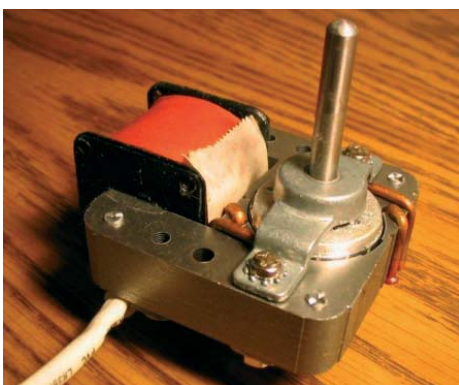
После запуска двигателя вспомогательная обмотка может быть отключена, например, центробежным контактом.

Другое решение заключается в использовании короткозамкнутых фазосдвигающих колец, которые встроены в статор. Такой тип двигателей находит применение в устройствах малой мощности (не более 100 Вт) (⇒ Рис. 10).

3-фазный двигатель (до 4 кВт) может быть использован в качестве однофазного: пусковой конденсатор устанавливается либо последовательно, либо параллельно с неиспользуемой обмоткой. Такая система может рассматриваться как временная мера, потому что мощность двигателя значительно уменьшается. Вся информация о схемах подключения, емкости конденсаторов и снижения мощности при однофазном применении указывается в документации производителей двигателей.



↑ Рис. 9 Принцип действия однофазного асинхронного двигателя



↑ Рис. 10 Однофазный двигатель с короткозамкнутыми фазосдвигающими кольцами

3. Электродвигатели и нагрузки

3.2 Однофазные двигатели

3.3 Синхронные двигатели



↑ Рис. 11 Универсальный однофазный двигатель

■ Универсальные (коллекторные) однофазные двигатели

Такой тип двигателей в промышленном оборудовании используется очень редко, но в то же время эти двигатели - самые распространённые в мире. Чаще всего они используются в бытовых приборах и переносном инструменте.

Их структура подобна двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением (⇒ Рис. 11).

Поскольку двигатель работает от переменного тока, направление поля в машине изменяется одновременно с изменением напряжения, поэтому вращающий момент всегда имеет одно направление.

Двигатель состоит из статора и ротора с обмотками, соединёнными с ламелями коллектора. Переключение выполняется щётками и коллектором.

Мощность двигателя может достигать 1000 Вт, а его скорость вращения без нагрузки - приблизительно 10000 оборотов в минуту. Конструкция этих двигателей предполагает их расположение внутри устройства. КПД двигателей очень низок.

3

3.3 Синхронные двигатели

■ Синхронные двигатели с магнитным ротором

□ Структура

Подобно асинхронному двигателю, синхронный двигатель состоит из статора и ротора, разделённых воздушным промежутком. Отличие заключается в том, что магнитный поток в воздушном зазоре не является следствием тока статора, а создаётся постоянными магнитами или током от внешнего источника постоянного тока, питающего обмотку ротора.

• Статор

Статор, аналогично асинхронному двигателю, состоит из корпуса и магнитной цепи, обычно изготовленной из пластин электротехнической стали, и 3-фазной обмотки, питающейся 3-фазным переменным током для создания вращающегося магнитного поля.

• Ротор

На роторе расположены постоянные магниты или обмотки возбуждения, питающиеся постоянным током. Они образуют постоянное магнитное поле. В отличие от асинхронного двигателя, ротор вращается со скоростью основного поля без скольжения.

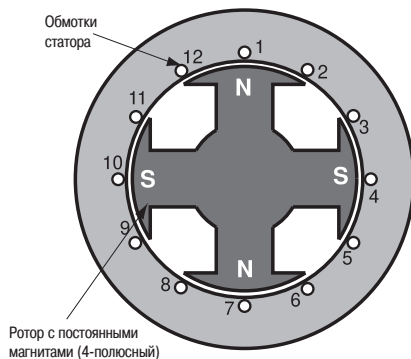
Имеется два типа синхронных двигателей: двигатели с постоянными магнитами на роторе и двигатели с обмоткой возбуждения на роторе.

- В первом случае ротор оснащен постоянными магнитами (⇒ Рис. 12), обычно из редкоземельных металлов, создающими сильное поле в небольшом пространстве. На статоре размещена обычная трехфазная обмотка.

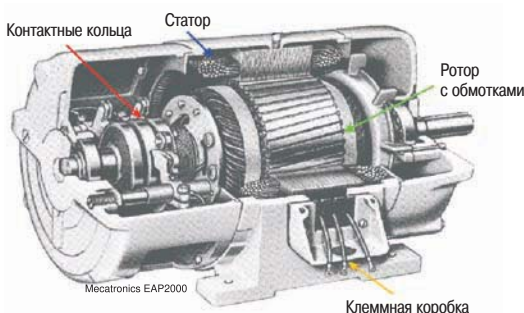
Эти двигатели обеспечивают высокие токовые перегрузки в режимах быстрого разгона. Они всегда оснащены контроллером скорости. Модули контроллеров скорости разработаны для специальных областей применения, таких как робототехника и электроинструмент, требующих высокодинамичных малогабаритных двигателей с большим диапазоном регулирования.

- Синхронные двигатели второго типа имеют ротор с обмотками (⇒ Рис. 13). Ротор подсоединён контактными кольцами, хотя есть и другие решения, например, с использованием вращающихся диодных мостов. Эти двигатели являются обратимыми и могут работать как генераторы (генераторы переменного тока) или как двигатели. Долгое время машины такого типа главным образом использовались как генераторы переменного тока. Как двигатели они фактически применялись лишь при необходимости работать с постоянной скоростью при больших изменениях момента нагрузки

Развитие непосредственных преобразователей частоты (или циклоконверторов) или неярких преобразователей, использующих способность синхронной машины генерировать реактивную мощность, позволило создать частотно - регулируемый электропривод, мощный, надёжный и весьма конкурентоспособный по сравнению с традиционными решениями, особенно на мощностях более 1 МВт.



↑ Рис. 12 Поперечное сечение 4-полюсного двигателя с постоянными магнитами



↑ Рис. 13 Синхронный двигатель с фазным ротором

На сегодняшний день в промышленности используются асинхронные двигатели мощностью до 5 МВт. При мощности более 5 МВт чаще всего используются синхронные машины, в большинстве случаев управляемые преобразователями частоты.

□ Рабочие характеристики

Вращающий момент синхронного двигателя пропорционален напряжению на его клеммах, тогда как в асинхронном двигателе он пропорционален квадрату питающего напряжения.

В отличие от асинхронного двигателя он может работать с коэффициентом мощности, равным единице, или очень близким к единице.

Если сравнивать синхронный двигатель с асинхронным двигателем при работе от сети с постоянными напряжением и частотой, то синхронный двигатель имеет ряд преимуществ:

- частота вращения двигателя является постоянной, независимо от нагрузки;
- он может использоваться как компенсатор реактивной мощности и улучшить коэффициент мощности установки в целом;
- синхронный двигатель может выдержать довольно большие провалы напряжения (приблизительно 50 %) без остановки при использовании системы форсировки возбуждения.

Однако, синхронный двигатель, питающийся от сети с постоянными напряжением и частотой, всё же имеет два недостатка:

- сложность запуска; при пуске без регулятора скорости синхронная машина должна запускаться на холостом ходу, для двигателей небольшой мощности или раскручиваться стартовым двигателем до подсинхронной скорости перед прямым подключением к сети;
- при превышении момента нагрузки над электромагнитным моментом двигателя синхронная машина останавливается, и требуется выполнить повторный процесс запуска.

■ Другие типы синхронных двигателей

Заканчивая краткий обзор промышленных двигателей, можно упомянуть линейные двигатели, синхронизированные асинхронные двигатели и шаговые двигатели.

□ Линейные двигатели

Структура линейных двигателей аналогична синхронным машинам с вращающимся ротором. Они состоят из статора (пластина) и линейно распределенного ротора (толкатель). В общем случае пластина перемещается на салазках вдоль ротора. Поскольку в таком двигателе отсутствует промежуточное механическое звено (редуктор и т.п.), то отсутствуют люфты и износ.

□ Синхронизированные асинхронные двигатели

Это синхронная машина со встроенной в ротор беличьей клеткой. При пуске двигатель работает как типичный асинхронный, при достижении подсинхронной скорости втягивается в синхронизм, а в случае увеличения нагрузки выше номинальной опять переходит в асинхронный режим, однако при этом имеет большую перегрузочную способность.

Обычно такие двигатели имеют небольшую мощность.

□ Шаговые двигатели

Шаговый двигатель движется в результате питания его обмоток электрическими импульсами. В зависимости от источника, питающего обмотки, он может быть:

- с однополярным питанием, если напряжение питания обмоток всегда имеет один знак;
- с разнополярным питанием, когда полярность питания обмоток меняется, т.е. происходит смена северного и южного магнитных полюсов.

Шаговые двигатели могут быть с переменным магнитным сопротивлением, магнитоэлектрическими или гибридными (⇒ Рис. 14).

Минимальный угол поворота между двумя электрическими импульсами называют шагом. Двигатель характеризуется числом шагов на оборот (то есть на 360°). Распространённые значения - 48, 100 или 200 шагов за оборот.

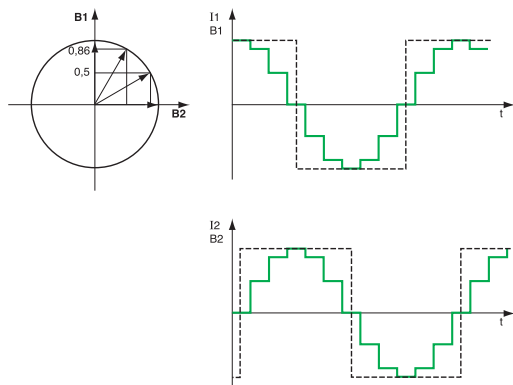
Тип	Биполярный с постоянными магнитами на роторе	Униполярный с переменным сопротивлением	Гибридный с разнополярным питанием
Характеристики	2 фазы, 4 катушки на фазу	4 фазы, 2 катушки на фазу	2 фазы, 2 катушки на фазу
Кол-во шагов за оборот	8	24	12
Этапы работы			
Шаг 1			
Промежуточное состояние			
Шаг 2			

↑ Рис. 14 Типы шаговых двигателей

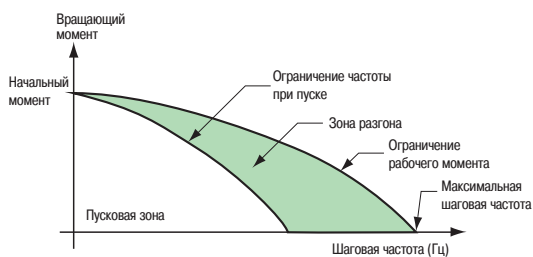
3. Электродвигатели и нагрузки

3.3 Синхронные двигатели

3.4 Двигатели постоянного тока



↑ Рис. 15 Ступенчатое изменение тока в катушках двигателя для уменьшения его шага



↑ Рис. 16 Максимальный вращающий момент в зависимости от шаговой частоты

Двигатель работает дискретно. Для улучшения работы число шагов может быть увеличено с помощью электроники (дробление шага). Такое решение более подробно описано в разделе по электронному управлению скоростью.

Ступенчатое изменение тока в катушках двигателя приводит к возникновению ступенчато изменяющегося магнитного поля, которое изменяется от одного устойчивого состояния к следующему. При этом происходит уменьшение длины шага (⇒ Рис. 15).

В некоторых схемах количество шагов в двигателе увеличено в 500 раз, обеспечивая изменение, например, от 200 до 100 000.

Управление формой и количеством импульсов, как правило, осуществляется электронными устройствами. Шаговые двигатели с блоком управления позволяют обеспечить скорость и положение управляемой оси с большой точностью.

Таким образом, они ведут себя аналогично синхронному двигателю при постоянном вращении, т.е. с конкретными ограничениями по частоте, моменту и инерции управляемой нагрузки (⇒ Рис. 16).

Когда эти пределы превышены, двигатель опрокидывается и останавливается.

Точное угловое позиционирование возможно без обратной связи. Мощность таких двигателей обычно менее 1 кВт, и используются они для маломощного низковольтного оборудования. В промышленности они решают задачи позиционирования (остановка после прохождения требуемого расстояния, управления клапанами, в оптических или измерительных приборах, прессах или в механизмах загрузки/разгрузки машин и т.п.).

Простота этого решения делает его особенно рентабельным (нет обратной связи). Шаговые двигатели с магнитами также имеют важное преимущество, обеспечивая удерживающий момент при отсутствии питающего напряжения. Однако, необходимо, чтобы информация о начальной позиции подвижной части была известна и передавалась в электронный блок для обеспечения эффективного управления.

3.4 Двигатели постоянного тока



↑ Рис. 17 Двигатель постоянного тока

Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением (⇒ Рис. 17) широко используются в приводах с регулированием частоты вращения механизмов, хотя с ними серьезно конкурируют асинхронные двигатели, управляемые преобразователями частоты.

Небольшие по габаритам, они идеально подходят для маломощных и низковольтных установок. Двигатели постоянного тока очень хороши для управления частотой вращения при мощности вплоть до нескольких мегаватт с недорогой, простой и высокоэффективной электроникой (диапазон изменения частоты вращения обычно от 1 до 100).

Они также способны точно поддерживать вращающий момент на валу при использовании как в двигательном, так и в генераторном режиме. Номинальная частота вращения легко подстраивается под требования, предъявляемые к оборудованию.

Однако двигатели постоянного тока имеют и ряд недостатков: они более сложны и дороги в изготовлении и требуют регулярного обслуживания коллектора и щеточных узлов.

■ Состав

Двигатель постоянного тока состоит из следующих частей:

□ Индуктор или статор

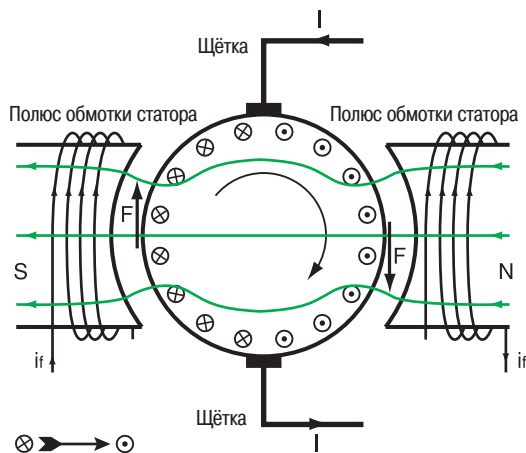
Индуктор представляет собой неподвижную магнитную систему с катушками для образования магнитного поля. Для небольших мощностей вместо катушек могут использоваться постоянные магниты. Полюса магнита имеют цилиндрическую выемку.

□ Якорь или ротор

Сердечник якоря представляет собой цилиндр, набранный из изолированных пластин электротехнической стали перпендикулярно оси цилиндра с пазами для укладки обмотки и укрепленный на валу машины. Якорь, являющийся подвижной частью, вращается вокруг своей оси и отделен от индуктора воздушным зазором. Распределенная обмотка якоря собирается из отдельных катушек с концами, выведенными на коллектор.

□ Коллектор и щётки

Коллектор выполнен в виде цилиндра, собранного из медных пластин, изолированных друг от друга миканитом или пластмассой. Он крепится на одном валу с сердечником якоря. Щетки представляют собой стержни из графита с добавлением металлических порошков. Они устанавливаются неподвижно и скользят по коллектору, обеспечивая питание обмотки якоря.



↑ Рис. 18 Создание вращающего момента в двигателе постоянного тока

■ Принцип действия

Когда на индуктор подано питание, он создает магнитное поле (поток возбуждения) в воздушном зазоре, направленное радиально по отношению к якорю. Магнитный поток проходит от северного полюса N через якорь к южному полюсу S.

При подаче питания на якорь двигателя в проводниках обмотки якоря, расположенных под полюсом, возникает (через щетки и коллектор) ток одного направления, и, таким образом, возникает сила по закону Лоренца. На проводники под другим полюсом также воздействует сила такой же величины и противоположно направленная. Обе силы создают момент, вращающий якорь ротора (⇒ Рис. 18).

Когда на якорь подано постоянное или выпрямленное напряжение U, и он вращается, возникает противоэлектродвижущая сила E, которая для работы машины в режиме двигателя определяется как $E = U - R \cdot I$. Величина RI представляет собой падение напряжения в якоря.

Противоэлектродвижущая сила E связана со скоростью и возбуждением зависимостью $E = k \cdot \omega \cdot \Phi$,

где:

- k - конструктивный коэффициент
- ω - угловая скорость
- Φ - магнитный поток (создаваемый обмоткой возбуждения)

Такая зависимость показывает, что при постоянном возбуждении противоэлектродвижущая сила E пропорциональна ω , т.е. является функцией скорости.

Вращающий момент связан с магнитным потоком и электрическим током в якоря выражением:

$$T = k \cdot \Phi \cdot I$$

При уменьшении магнитного потока момент уменьшается.

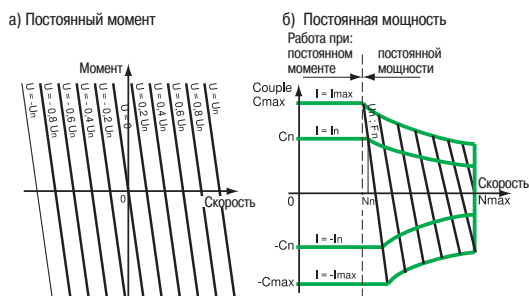
Есть два способа увеличить скорость:

- увеличение противо э.д.с. E и, соответственно, увеличение напряжения питания; это так называемое регулирование при постоянном моменте;
- уменьшение магнитного потока возбуждения и, следовательно, тока возбуждения при неизменном напряжении на якоря; это так называемое «ослабление поля» или регулирование при постоянной мощности; при этом происходит уменьшение момента при возрастании скорости (⇒ Рис. 19).

Кроме того, для высоких значений при регулировании с постоянной мощностью требуются специальные двигатели, адаптированные механически и электрически для решения проблем с коммутацией.

Машины постоянного тока обратимы, что означает возможность работы как в двигательном, так и в генераторном режимах:

- если нагрузка создает момент, направленный против вращения двигателя (резистивная нагрузка), машина работает в двигательном режиме;
- если момент нагрузки направлен в сторону вращения вала двигателя (движущая нагрузка) или препятствует остановке двигателя при торможении во время остановки за счет инерции, двигатель производит электрическую энергию и работает в генераторном режиме.



↑ Рис. 19 Механическая характеристика двигателя с независимым возбуждением

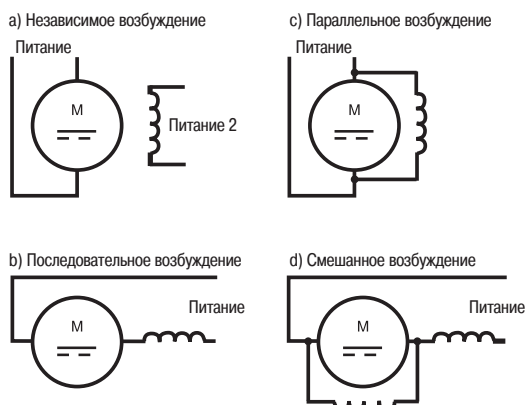
■ Классификация двигателей постоянного тока по типу возбуждения (⇒ Рис. 20)

• а и с – независимое и параллельное возбуждение

Обмотки якоря и индуктора соединены параллельно, либо обмотка возбуждения имеет свое напряжение питания, часто отличное от напряжения питания якоря (например, напряжение питания якоря 400 В, а на обмотку возбуждения подается 180 В). Двигатель реверсируется изменением полярности одной из обмоток. Обычно изменяется полярность якоря, имеющего значительно меньшую постоянную времени. Большинство регуляторов приводов постоянного тока осуществляют реверс сменой полярности напряжения на якоря двигателя.

• b – последовательное возбуждение

Обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря, отсюда и название. Реверсирование осуществляется переключением полярности питания якоря или индуктора. В основном применяется в качестве тягового двигателя, в частности в трамваях, работающих от аккумуляторных батарей, в тяговых установках локомотивов. На предыдущем поколении скоростных поездов использовался этот тип двигателей. На новых поездах уже используются асинхронные двигатели.



↑ Рис. 20 Варианты схем возбуждения двигателей постоянного тока

• **d – смешанное возбуждение**

В двигателе смешанного возбуждения объединены преимущества двигателей последовательного и параллельного возбуждения. Он содержит в себе две обмотки. Одна параллельна якорю (параллельная обмотка) или независимая (независимое возбуждение). Ток обмотки мал по сравнению с током якоря. Другая обмотка является последовательной. Поле двигателя создается путем суммирования полей, возникающих в ампервитках обеих катушек. Как правило, используется управление при суммировании потоков двух обмоток, потому что при использовании для возбуждения разности потоков двух обмоток имеется нестабильность работы при высоких нагрузках.

3.5 Работа асинхронных двигателей

■ **Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (беличья клетка)**

□ **Влияние изменения питающего напряжения на параметры двигателя**

• **Ток двигателя**

Увеличение напряжения выше номинального характеризуется двумя особенностями. При пуске двигателя, пусковой ток будет больше. Если поднимать напряжение на работающем двигателе, потребляемый ток скачкообразно возрастает и возможен перегрев двигателя даже при небольшой нагрузке. Это увеличение тока происходит из-за насыщения магнитной системы двигателя.

• **Скорость двигателя**

При изменении напряжения синхронная скорость остается неизменной, но при нагруженном двигателе возрастание напряжения приводит к незначительному уменьшению скольжения. На практике это свойство не может быть использовано из-за насыщения двигателя, поскольку происходит скачкообразный рост тока, и возможен перегрев двигателя. Таким же образом при уменьшении питающего напряжения происходит увеличение скольжения, и потребляемый ток возрастает, чтобы обеспечить требуемый момент. Это также может привести к перегреву двигателя.

Более того, поскольку максимальный момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения, возможна полная остановка двигателя при глубокой просадке напряжения.

□ **Влияние изменения частоты на параметры двигателя**

• **Вращающий момент двигателя**

Как в любой электрической машине, момент асинхронного двигателя определяется по формуле: $T = K I \varphi$ (K – постоянная, зависящая от конструктивных особенностей двигателя).

В схеме замещения, как показано на *Рис. 21*, катушка L генерирует магнитный поток и I_0 – ток намагничивания. Отметим, что схема замещения для асинхронного двигателя такая же, как и у трансформатора, и оба устройства описываются одинаковыми уравнениями.

В первом приближении без учета сопротивления рассматриваем только намагничивающую индуктивность (т.е. для частот в несколько Гц), ток I_0 определяется по формуле $I_0 = U / 2\pi L f$ и выражение для потока:

$$\varphi = k I_0$$

Тогда выражение для момента двигателя примет вид:

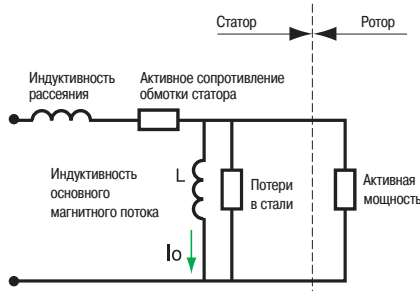
$$T = K k I_0 I. I_0 \text{ и } I - \text{ величины токов для данного двигателя.}$$

Для того чтобы не выходить за допустимые пределы, I_0 должен поддерживаться на номинальном значении, которое обеспечивается только при выполнении условия $U/f = \text{const}$.

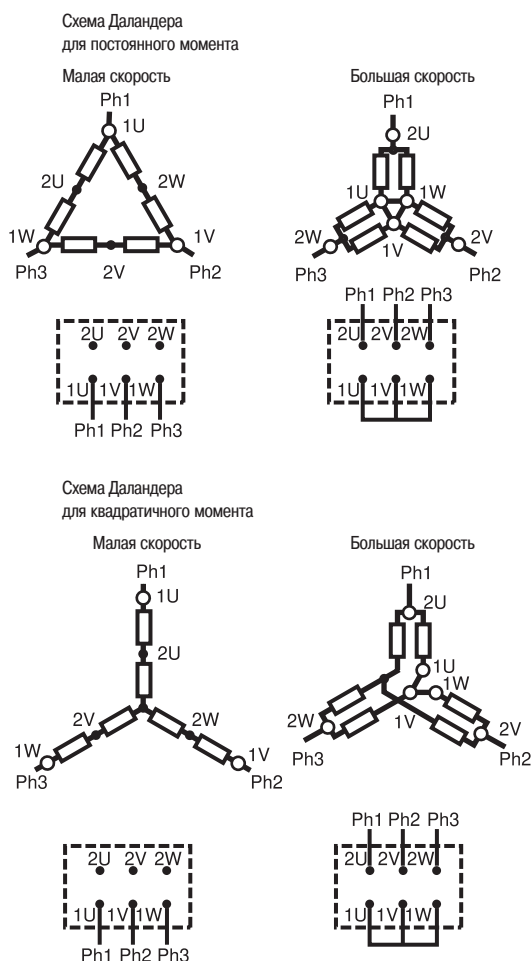
Следовательно, номинальный момент при номинальном токе может быть получен только при определенном соотношении величины питающего напряжения и его частоты.

В случае если это соотношение нельзя обеспечить, возможно только увеличение частоты, но тогда уменьшится ток I_0 . Это приведет к уменьшению вращающего момента, поскольку невозможно непрерывно превышать номинальный ток без риска перегрева двигателя.

Для работы с постоянным моментом при любой скорости необходимо поддерживать постоянным соотношением U/f . Эта задача возлагается на преобразователь частоты.



↑ *Рис. 21* Схема замещения асинхронного двигателя



↑ Рис. 22 Типы включения обмоток двигателя по схеме Даландера

• Влияние на скорость

Скорость вращения асинхронного двигателя пропорциональна частоте питающего напряжения. Это свойство часто используется в механизмах, работающих на высоких скоростях, например, с источником питающего напряжения с частотой 400 Гц (дробилки, лабораторные и хирургические инструменты и т.д.). Возможно также регулирование скорости изменением частоты, например, от 6 до 50 Гц (роликовые конвейеры, подъемно-транспортное оборудование и т.д.)

□ Способы управления скоростью 3-фазных асинхронных электродвигателей

В течение достаточно длительного промежутка времени существовало не так много способов регулирования скорости асинхронных электродвигателей. Двигатели с короткозамкнутым ротором применялись в основном при работе с номинальной частотой вращения.

Практически переключение скоростей было возможно только переключением количества полюсов двигателей или при использовании многообмоточных двигателей. Они до сих пор широко распространены и используются в лифтах.

В настоящее время в связи с развитием преобразователей частоты появилась возможность использования общепромышленных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в тех областях, где ранее традиционно применялись двигатели постоянного тока.

□ Асинхронные двигатели с изменением числа полюсов

Как уже ранее отмечалось, скорость вращения двигателя с короткозамкнутым ротором зависит от частоты питающего напряжения и числа пар полюсов. Поэтому двигатель с двумя и более скоростями может быть получен путем сочетания обмоток статора для получения различного числа полюсов.

Этот тип двигателей может иметь только соотношение скоростей кратное 2 (4 и 8 полюсов, 6 и 12 полюсов и т.д.). В клеммной коробке находится 6 клемм (⇒ Рис. 22).

Для одной из этих скоростей питающее напряжение подается на клеммы (1U, 1V, 1W). Для другой скорости эти клеммы соединяются друг с другом, а питание подводится к оставшимся клеммам (2U, 2V, 2W).

В большинстве случаев как для большой, так и для малой скорости двигатель подключается к сети напрямую прямым пуском.

В ряде случаев, если этого требует технология, и двигатель допускает такой режим работы, возможно включение малой скорости перед переходом к большой при разгоне и при остановке с большой скорости при помощи управляющего устройства.

В зависимости от величин токов, потребляемых на малой скорости и большой скорости возможно использование либо одного теплового реле защиты, либо двух реле (одно для каждой скорости).

Такие двигатели обычно имеют низкий к.п.д. и достаточно низкий $\cos \varphi$.

□ Двигатель с независимыми обмотками статора

Эти двигатели с двумя электрически разделенными обмотками статора могут обеспечить работу на двух скоростях в любом соотношении. Однако на их электрические характеристики часто влияет тот факт, что обмотки малой скорости обеспечивают компенсацию электрических и механических ударных воздействий при работе на большой скорости. Поэтому при работе на низкой скорости двигатели иногда потребляют больший ток, чем при работе на большой скорости.

3- или 4-скоростные двигатели могут быть сконструированы путем изменения числа полюсов в одной или в обеих обмотках. Это решение требует дополнительных коммутаций в обмотках.

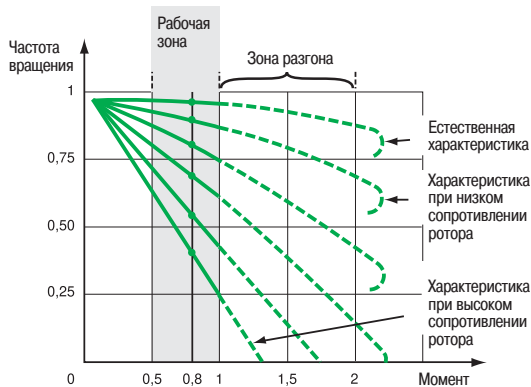
■ Двигатели с контактными кольцами

□ Сопротивление в цепи ротора

Подключение внешнего резистора в цепь ротора такого двигателя определяет:

- пусковой момент;
- скорость.

При постоянно подключенном резисторе к клеммам двигателя с контактными кольцами скорость двигателя уменьшается, и чем больше сопротивление, тем больше падение скорости. Это решение является простейшим способом регулирования скорости.



↑ **Рис. 23** Механическая характеристика двигателя с фазным ротором при различных значениях сопротивлений

□ Регулирование скорости изменением скольжения

Сопротивление резистора в цепи ротора может ступенчато изменяться путем шунтирования его отдельных секций для дискретного регулирования скорости или для постепенного разгона при пуске двигателя.

В случае регулирования скорости сопротивления находятся в работе постоянно, причем для обеспечения надежной работы приходится увеличивать их размеры, и соответственно, стоимость. Этот метод управления достаточно прост, однако он используется в настоящее время все реже, поскольку имеет два недостатка:

- при низкой частоте вращения на резисторах рассеивается большая мощность и имеют место значительные потери;
- скорость вращения при постоянном сопротивлении сильно зависит от нагрузки – двигатель имеет круто падающую характеристику (⇒ *Рис. 23*).

При включении резистора в обмотку ротора скольжение пропорционально моменту нагрузки. Например, падение скорости, вызванное резистором, может достигать 50% при полной нагрузке и только 25% при половине номинальной нагрузки по отношению к скорости холостого хода. Скорость сильно меняется, и ее величина отличается от синхронной скорости на величину скольжения.

При управлении приводом оператором возможно установить заданное значение частоты вращения путем изменения сопротивления резистора для достаточно высокой нагрузки, однако при работе в режиме, близкому к холостому ходу, регулировка практически невозможна. Для получения возможности регулировки при малой нагрузке на небольшой частоте вращения необходимо резко увеличить величину вводимого в цепь ротора сопротивления, однако это чревато скачкообразным изменением скорости от 0 до 100% при небольшом изменении момента на валу двигателя. Это весьма нестабильный режим работы.

Также такой способ регулирования частоты вращения неприменим для некоторых специальных машин, имеющих нестандартные механические характеристики.

На *рис. 23* проиллюстрирован пример управления частотой вращения двигателя. При различных значениях сопротивлений и моменте нагрузки 0,8 C_n могут быть получены различные скорости, отмеченные знаком 0 на диаграмме. При одинаковом моменте нагрузки скорость уменьшается при увеличении сопротивления ротора.

■ Другие способы управления частотой вращения

□ Регулятор напряжения

Это устройство используется только в маломощных асинхронных двигателях с резистивным короткозамкнутым ротором с беличьей клеткой.

Скорость регулируется путем увеличения скольжения при уменьшении питающего напряжения.

Этот способ широко применялся в устройствах с квадратичной нагрузкой (вентиляторы, насосы, компрессоры и т.п.). В настоящее время этот способ заменяется использованием преобразователей частоты.

□ Другие электромеханические системы

Электромеханические системы управления скоростью, рассматриваемые ниже, применяются в настоящее время реже, чем электронные регуляторы скорости.

• Асинхронные двигатели с беличьей клеткой типа Schrage

Это специальные двигатели, где управление скоростью выполняется путём изменения позиции щёток на коллекторе относительно нейтрали.

• Привод с электромагнитной муфтой

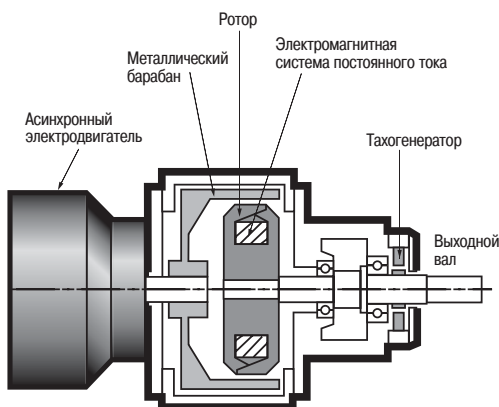
Эти приводы состоят из барабана, механически соединенного с асинхронным двигателем, вращающимся с постоянной скоростью, и ротора с катушкой, питающейся постоянным током (⇒ *Рис. 24*).

Крутящий момент от ведущей части механизма к ведомой передается посредством поля, управляемого электромагнитной системой. Скольжение может регулироваться величиной постоянного тока в катушке.

Встроенный тахогенератор предназначен для точного поддержания частоты вращения.

Система вентиляции обеспечивает отвод тепла, выделяемого за счет скольжения.

Устройство широко применялось ранее в основном в грузоподъемном оборудовании, в частности, на кранах. Имеет небольшой износ, применяется для мощностей привода до 100 кВт.

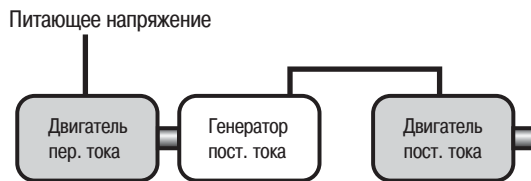


↑ **Рис. 24** Поперечное сечение индукционной электромагнитной муфты

3. Электродвигатели и нагрузки

3.5 Работа асинхронных двигателей

3.6 Сравнение электродвигателей



↑ Рис. 25 Схема Вард-Леонарда

• Схема Вард-Леонарда

Это устройство в недалеком прошлом было очень широко распространено. Схема включает в себя двигатель переменного тока, генератор постоянного тока, питающий двигатель постоянного тока (⇒ Рис. 25).

Скорость регулируется путем изменения возбуждения генератора.

Требуется небольшая мощность управления для регулирования выходной мощности в несколько сотен киловатт с характеристиками, расположенными во всех квадрантах системы координат «скорость – вращающий момент». Схема широко использовалась на металлопрокатных станах и шахтных подъемниках.

Это была самая эффективная система управления частотой вращения до появления полупроводников.

□ Механические и гидравлические регуляторы скорости

Механические и гидравлические регуляторы скорости до сих пор находят свое применение. Было разработано большое количество механических систем управления скоростью (шкивы/ленты, опоры и т.д.). Недостатки этих регуляторов состоят в том, что они требуют тщательного обслуживания и достаточно сложны в управлении. В настоящее время с ними серьезно конкурируют преобразователи частоты.

Гидравлические регуляторы скорости до сих пор используются в специализированных приложениях.

Они обладают хорошим соотношением «мощность/масса» и способны непрерывно поддерживать высокий вращающий момент при очень малых скоростях. В промышленности они в основном применяются в системах электроснабжения.

Поскольку этот тип регуляторов не имеет отношения к предмету Руководства, мы не будем рассматривать его подробно.

3.6 Сравнение электродвигателей

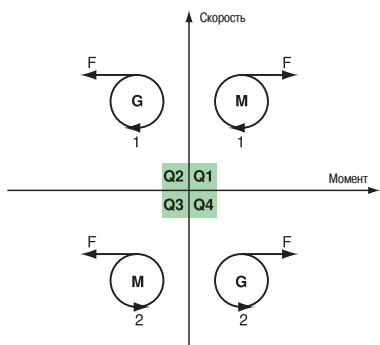
Таблица на Рис. 26 дает краткое описание всех доступных типов электрических двигателей, их главных особенностей и областей применения.

Нам хотелось бы обратить внимание на поле таблицы, относящееся к трёхфазным двигателям с короткозамкнутым ротором, которое помечено термином «Стандарт». Дело в том, что преобразователи частоты с этими двигателями позволяют им очень точно соответствовать требованиям приложений.

Тип двигателя	Асинхронный с короткозамкнутым ротором		Асинхронный с фазным ротором	Синхронный с обмоткой возбуждения	Синхронный с пост. магнитами	Шаговый электро-двигатель	Двигатель постоянного тока
	3-фазный	1-фазный					
Стоимость двигателя	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая
Герметичность мотора	Стандарт	Возможна	Дорогая опция	Дорогая опция	Стандарт	Стандарт	Возможно очень дорого
Прямой пуск	Простой	Простой	Специальное стартовое устройство	Невозможно после нескольких кВт	Не предназначен	Не предназначен	Не предназначен
Регулирование скорости	Простое	Редко	Возможно	Часто	Всегда	Всегда	Всегда
Стоимость решения по регулированию скорости	Наиболее выгодно	Очень выгодно	Выгодно	Выгодно	Довольно выгодно	Очень выгодно	Очень выгодно
Качество регулирования скорости	От высокого до очень высокого	Очень низкое	Среднее	Высокое	Очень высокое	От среднего до высокого	От высокого до очень высокого
Режим	Постоянная или переменная скорость	В основном постоянная скорость	Постоянная или переменная скорость	Постоянная или переменная скорость	Переменная скорость	Переменная скорость	Переменная скорость
Использование в промышленности	Универсальное	Для небольшой мощности	Уменьшающееся	Высокая мощность при среднем напряжении	Высоко динамичное устройство	Открытая система позиционирования для небольшой мощности	Уменьшающееся

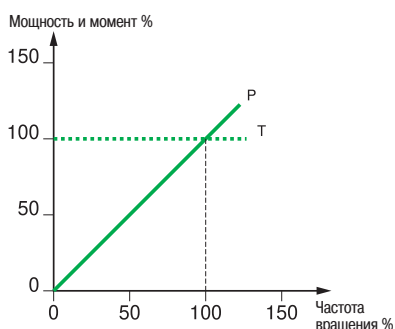
↑ Рис. 26 Сравнение электродвигателей

3.7 Типы нагрузок

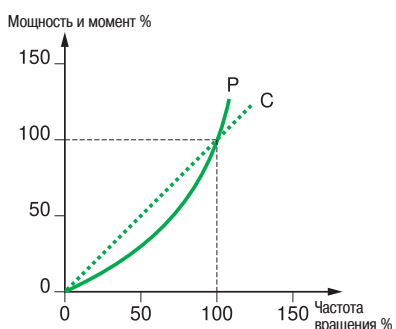


Направление вращения	Режим работы	Момент T	Частота вращения S	Произведение TS	Квадрант
1 (по часовой стрелке)	Двигатель	Да	Да	Да	1
	Генератор		Да		2
2 (против часовой стрелки)	Двигатель			Да	3
	Генератор	Да			4

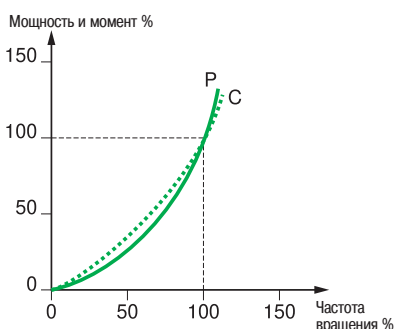
↑ Рис. 27 Возможные режимы работы электрической машины



↑ Рис. 28 Характеристика работы при постоянном моменте



a



b

↑ Рис. 29 Характеристики работы при переменном моменте

Условно можно разделить нагрузки на два больших семейства:

- активная нагрузка - это нагрузка, которая придает движение какому-либо объекту, либо вызывает изменение состояния вещества (переход вещества из жидкого состояния в газообразное, к примеру);
- пассивная нагрузка, соответственно, не создает каких-либо движущих сил. К пассивной нагрузке можно отнести электрообогрев и освещение.

■ Активные нагрузки

Этот термин относится ко всем системам, разработанным для перемещения подвижных объектов. Движение подвижных объектов сопровождается изменением их скорости или положения, которое подразумевает приложение момента для преодоления его сопротивления движению, а также для ускорения инерционной массы нагрузки. Скорость движения напрямую связана с прикладываемым моментом.

□ Рабочие квадранты

Рис. 27 иллюстрирует четыре возможных ситуации работы машины на диаграмме «скорость – момент».

Заметим, что когда машина работает как генератор, к ней должна быть приложена внешняя движущая сила. Этот режим используется, в частности, для торможения. Кинетическая энергия на валу двигателя либо возвращается в питающую сеть, либо рассеивается на резисторе, или, для малых мощностей, выделяется в двигателе.

□ Режимы работы

• Работа с постоянным моментом

При работе с постоянным моментом подразумевается, что характеристики нагрузки в установившемся режиме таковы, что требуемый момент на валу двигателя примерно одинаков при любой скорости (⇒ Рис. 28).

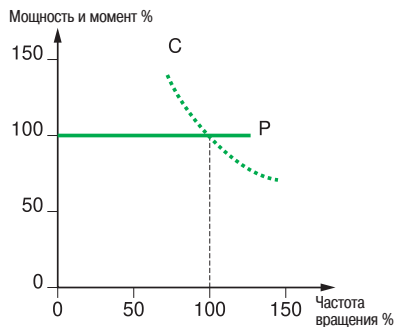
Такой режим работы характерен для конвейеров, лебедок, дробильных установок. Такой тип нагрузки требует обеспечения высокого пускового момента (150% от номинального и больше) для преодоления статического трения и ускорения механизма при разгоне для преодоления инерции.

• Работа с моментом, возрастающим с увеличением частоты вращения

Характеристики нагрузки подразумевают увеличение требуемого момента на валу двигателя при возрастании скорости. В этом случае может быть как линейная зависимость момента сопротивления от частоты вращения (для винтовых машин) (⇒ Рис. 29a), так и квадратичная (для центробежных вентиляторов и насосов) (⇒ Рис. 29b).

Мощность винтовой машины пропорциональна квадрату частоты вращения, а, соответственно, мощность центробежных механизмов пропорциональна частоте вращения в третьей степени.

Для этих целей требуется пусковое устройство, обладающее меньшим пусковым моментом (обычно значение 1.2 от номинального момента двигателя является достаточным).



↑ Рис. 30 Характеристика работы при постоянной мощности

• **Работа с моментом, убывающим с ростом скорости (работа с постоянной мощностью)**

Для некоторых механизмов требуемый момент на валу двигателя уменьшается с ростом скорости. Это в частности имеет место при работе с постоянной мощностью, когда момент на валу двигателя обратно пропорционален угловой скорости.

Это, например, используется в намоточной машине, где требуется уменьшение угловой скорости при увеличении диаметра бобины по мере намотки материала. Этот режим нашел также применение в приводе шпинделя на обрабатывающих станках.

Рабочий диапазон при работе с постоянной мощностью ограничен естественной сущностью этого способа регулирования: при малых скоростях – максимально допустимым током регулятора скорости, при больших скоростях – моментом, который способен развить двигатель. Поэтому необходимо тщательно проверить величину крутящего момента при использовании асинхронного двигателя и коммутационную способность у двигателей постоянного тока.

В таблице на (⇒ Рис. 31) систематизированы механические характеристики наиболее распространенных механизмов с указанием их механических характеристик.

Тип механизма	Механическая характеристика
Конвейер	Постоянный момент
Ротационный пресс	Постоянный момент
Винтовой насос	Момент линейно пропорционален частоте вращения
Дозировочный насос	Постоянный момент
Центробежный насос	Момент пропорционален квадрату частоты вращения
Вентилятор (центробежный, осевой)	Момент пропорционален квадрату частоты вращения
Витовой компрессор	Постоянный момент
Спиральный компрессор	Постоянный момент
Поршневой компрессор	Постоянный момент
Цементная печь	Постоянный момент
Экструдер	Постоянный момент или уменьшается линейно пропорционально частоте вращения
Механический пресс	Постоянный момент
Мотальный станок	Постоянный момент или линейно уменьшается пропорционально частоте вращения
Протирочная машина (пульпер)	Постоянный момент
Дробилка	Постоянный момент
Миксер	Момент линейно увеличивается пропорционально частоте вращения
Тестомесильная машина, валок	Постоянный момент или уменьшается пропорционально частоте вращения
Центрифуга	Момент увеличивается пропорционально квадрату частоты вращения
Подъемник	Постоянный момент
Шпиндель обрабатывающего станка	Постоянный момент или уменьшается линейно со скоростью

↑ Рис. 31 Механические характеристики промышленного оборудования

Достаточно часто приходится осуществлять запуск оборудования, имеющего очень большой пусковой момент сопротивления (к примеру, дробилка с заполненным бункером). Также возможно наличие сухого трения при старте, которое пропадает, когда машина работает или запускается из холодного состояния, и потребуются более высокий пусковой момент, чем в нормальной работе при нагретом состоянии.

■ **Пассивные нагрузки**

Существуют два типа пассивной нагрузки, используемой в промышленности:

- обогрев (отопление);
- освещение.

□ **Обогрев**

Обогрев – серьезная статья расходов энергии для промышленных предприятий. Единственный способ снижения затрат – это уменьшение потерь тепла. Эта проблема в очень большой степени зависит от проекта здания и выходит за рамки данного издания. Каждый проект имеет свою специфику, и было бы непозволительно давать общие неопределенные советы. Исходя из вышесказанного, надлежащий менеджмент строительства позволит обеспечить надлежащий комфорт при значительном энергосбережении.

Соответствующая информация имеется в в «Руководстве по устройству электроустановок», а также в Cahier Technique 206. Данные документы доступны на сайте Schneider Electric.

В любом случае, лучшее решение можно найти, обращаясь при разработке и реализации проектов к экспертам организаций – поставщиков оборудования.

□ **Освещение**

• **Лампы накаливания**

Изобретение Томасом Эдисоном лампы накаливания, запатентованной в 1879 году, фактически было революционным событием. С тех пор многие годы все имеющиеся системы освещения были основаны на этом устройстве, излучающем свет при нагревании нити из тугоплавкого металла до высокой температуры. Этот тип освещения все еще наиболее широко используется, но имеет два существенных недостатка:

- чрезвычайно низкая эффективность, так как большая часть потребляемой энергии расходуется на выделение тепла;
- срок службы лампы накаливания не превышает нескольких тысяч часов. Соответственно, лампы должны постоянно заменяться. Срок службы был несколько увеличен внедрением нескольких усовершенствований (например, в результате заполнения колбы инертными газами, такими как криптон или галоген).

Многие страны планируют в ближайшем будущем отказаться от освещения лампами накаливания.

• **Люминесцентные осветительные приборы**

Это семейство включает в себя люминесцентные трубки и малогабаритные люминесцентные лампы. При их изготовлении обычно применяется технология «пары ртути при низком давлении».

Трубчатые люминесцентные лампы

Первые лампы появились в 1938 году. В этих трубках при электрическом разряде электроны сталкиваются с парами ртути, в результате чего происходит возбуждение атомов ртути и возникает ультрафиолетовое излучение.

Люминесцентное покрытие внутри трубки преобразует излучение в видимый свет.

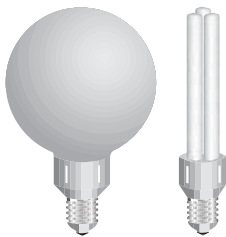
Люминесцентные лампы выделяют меньше тепла и служат дольше, чем лампы накаливания, но требуют для работы использования двух устройств: одно для их запуска (стартер) и другое, называемое стабилизатором, для регулирования тока дуги во включенном состоянии.

Стабилизатор обычно представляет собой токоограничивающий дроссель, включенный последовательно с лампой.

Малогабаритные люминесцентные лампы (⇒ Рис. 32)

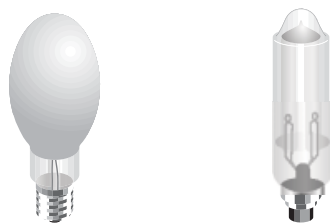
Малогабаритные люминесцентные лампы работают по принципу аналогичному люминесцентным трубкам. Функции стартера и стабилизатора в лампе выполняет электронная схема, что позволило уменьшить габариты лампы и использовать стандартный цоколь (вкручивание в патрон).

Малогабаритные люминесцентные лампы развивались как альтернатива лампам накаливания. Они существенно экономят электроэнергию (15 вместо 75 Вт при одинаковой яркости) и имеют существенно больший срок службы (8000 часов в среднем и до 20000 часов для некоторых типов).



↑ Рис. 32

Малогабаритные люминесцентные лампы



↑ Рис. 33

Газоразрядные лампы

Газоразрядные лампы (⇒ Рис. 33)

Световое излучение образуется электрическим разрядом, возникающим между двумя электродами в газе в кварцевой колбе. Для ламп этого типа необходимо использовать стабилизатор, обычно это токоограничивающий реактор для управления током дуги. Сила излучения очень сильно зависит от состава газа в колбе и возрастает при увеличении давления. Для различных целей используются несколько технологий.

Натриевые лампы низкого давления

Обладают самой высокой световой отдачей, но имеют бедную цветовую передачу, поскольку они излучают монохромный оранжевый свет.

Области использования: освещение дорог, туннелей.

Натриевые лампы высокого давления

Излучают белый свет с оранжевым оттенком.

Области использования: городское освещение, освещение памятников.

Ртутные лампы высокого давления

Разряд возникает в кварцевой или керамической колбе при давлении, достигающем 100 кПа. Такие лампы известны как флуоресцентные и характеризуются бело-голубым излучаемым светом

Области использования: автомобильные парковки, супермаркеты, склады.

• Галогенные лампы

Это наиболее современная технология. Лампы излучают свет в широком спектре. Трубка выполнена из керамики для повышения излучающей способности и стабильности цвета.

Области использования: стадионы, магазины, прожекторное освещение.

• LED (Light Emitting Diodes) - светоизлучающие диоды

Это одна из наиболее перспективных технологий. Светодиоды излучают свет при прохождении электрического тока через полупроводник.

Светодиоды используются для многих целей, а недавнее изобретение диодов с голубым и белым свечением и высокой излучающей способностью открывает новые возможности, в частности, для сигнализации (светофоры, дисплеи систем безопасности, аварийное освещение) и светового оборудования автомобилей.

Среднее потребление тока светодиодом составляет 20 мА при падении напряжения от 1.7 до 4.6 В, в зависимости от цвета излучения. Такие характеристики позволяют применять источники питания с очень низким напряжением, в частности, аккумуляторы.

Для питания от сети необходимо использовать трансформатор, но это экономически все равно оказывается оправданным.

Преимуществом светодиодов является их низкое энергопотребление, следствием чего являются низкая рабочая температура и практически неограниченный ресурс времени работы. В ближайшем будущем появится возможность встраивать такое освещение в здания на стадии строительства.

Однако у стандартного диода очень низкая освещающая способность, поэтому для яркого освещения требуется последовательное включение большого числа элементов.

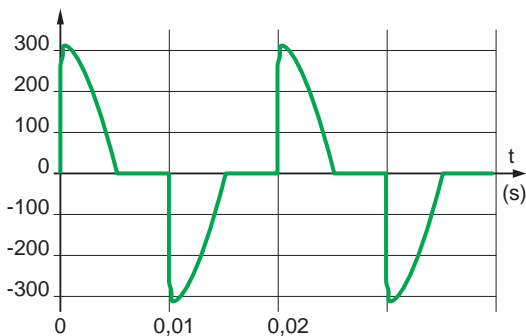
Поскольку у светодиодов отсутствует тепловая инерция, они могут использоваться в инновационных целях, таких как одновременная передача света и данных. Для этого источник питания модулируется высокой частотой. Человеческий глаз не в состоянии заметить эту модуляцию, но приемник с соответствующим интерфейсом может распознать сигналы для их последующего использования.

□ Особенности электропитания источников света

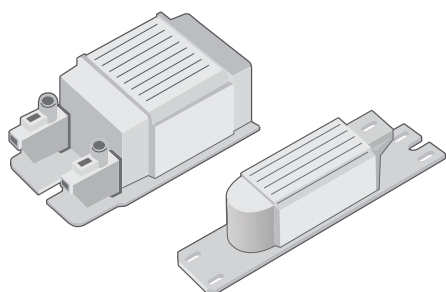
• Ограничения при прямой подаче питания

Сопротивление нити накаливания очень сильно изменяется при нагреве из-за очень высокой температуры (до 2500 °С), которой она достигает во время работы. При холодном состоянии сопротивление невелико, и при подаче питания на лампу происходит бросок тока, который в течение нескольких десятков миллисекунд в 10-15 раз превышает номинальный ток.

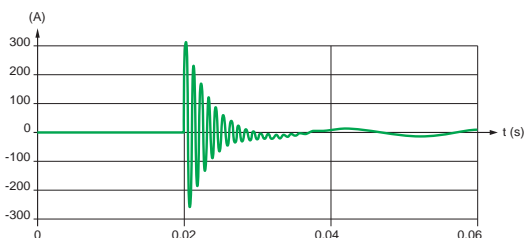
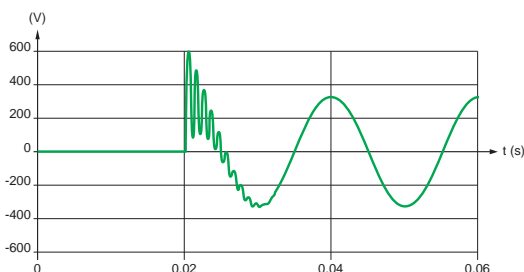
Это относится как к обычным, так и к галогенным лампам и накладывает ограничения по количеству подключаемых ламп к коммутирующему устройству (выключатель, реле) в готовых сетях.



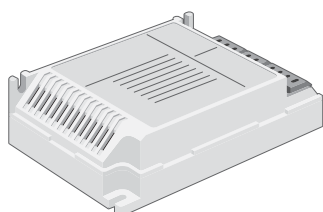
↑ Рис. 34 Формы кривой напряжения



↑ Рис. 35 Балластный дроссель



↑ Рис. 36 Кривые напряжения и тока



↑ Рис. 37 Электронное пускорегулирующее устройство

• Регулировка яркости света

Этот способ регулировки может быть получен путем изменения действующего значения напряжения, подводимого к источнику света. Обычно напряжение регулируется при помощи симистора путем изменения угла отпирания в цикле питающего напряжения.

Форма кривой питающего напряжения показана на Рис. 34.

Постепенное включение лампы снижает и даже исключает скачок потребляемого тока при включении.

Отметим, что регулировка изменением подводимого напряжения:

- искажает цветопередачу;
- сокращает продолжительность работы галогенных ламп, особенно если низкое напряжение прикладывается в течение длительного времени. При низких температурах регенерация вольфрамовой нити накаливания происходит с меньшей интенсивностью.

Некоторые галогенные лампы питаются низким напряжением через трансформатор.

Намагничивание трансформатора может приводить к броскам тока в 50-75 раз большим, чем номинальный, в течение нескольких миллисекунд. Для исключения этих недостатков в настоящее время предлагаются статические преобразователи энергии.

• Питание люминесцентных и газоразрядных ламп

Для работы люминесцентных трубок и разрядных ламп требуется регулировать ток дуги.

Эту функцию выполняют стабилизирующие устройства, встраиваемые в лампу.

Магнитный стабилизатор (т.е. токоограничивающий дроссель (⇒ Рис. 35) в основном используется в быту.

Магнитный стабилизатор работает совместно с пусковым устройством (стартером). Стартер выполняет две функции: подогрев электродов лампы и формирование импульса высокого напряжения для запуска лампы.

Импульсы высокого напряжения образуются при коммутации контакта (управляемого биметаллическим ключом), который прерывает ток в магнитном дросселе. При работе стартера (примерно в течение 1 с) потребляемый на освещение ток примерно равен двукратному номинальному току.

Поскольку ток, потребляемый лампой совместно со стабилизатором, является в основном индуктивным, коэффициент мощности очень мал (в среднем 0.4 – 0.5). В осветительной арматуре с большим количеством ламп следует использовать компенсирующий конденсатор для улучшения коэффициента мощности. Этот конденсатор обычно ставится на каждый осветительный прибор.

Емкость конденсатора подбирается таким образом, чтобы коэффициент мощности был не менее 0.85.

В общем случае при параллельном включении конденсатора необходимая емкость конденсатора составляет 1 мкФ на 10 Вт мощности для любых типов ламп.

Параллельное включение конденсатора приводит к броску тока и затухающему колебательному процессу при подаче питания на лампу.

Поскольку конденсатор первоначально разряжен, при подаче питания происходит бросок тока (⇒ Рис. 36).

Существуют также всплески мощности из-за прерывания питания в цепи «дроссель/конденсатор» при работе стартера.

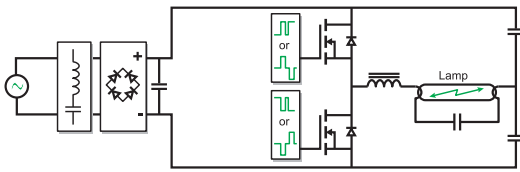
Электронное пускорегулирующее устройство (⇒ Рис. 37), созданное в 80-х годах прошлого века, устранило недостатки, присущие стандартной пускорегулирующей аппаратуре. Выходное напряжение на выходе этого устройства представляет собой знакопеременные прямоугольные импульсы.

Можно разделить электронные источники питания на низкочастотные, с выходной частотой от 50 до 500 Гц, и высокочастотные, с частотой от 20 до 60 кГц. Высокочастотные импульсные источники питания позволяют полностью исключить при горении лампы мерцание и стробоскопический эффект.

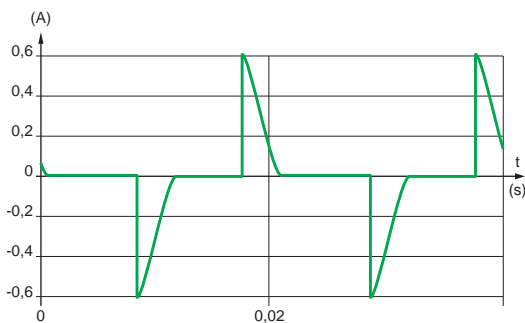
3. Электродвигатели и нагрузки

3.7 Типы нагрузок

3.8 Клапаны и электрические винтовые механизмы



↑ Рис. 38 Электронное пускорегулирующее устройство



↑ Рис. 39 Кривая тока при использовании электронного пускорегулирующего устройства

Электронный стабилизатор работает бесшумно. В процессе разогрева лампы напряжение на лампе регулируется таким образом, чтобы величина тока оставалась практически постоянной. При работе лампы приложенное к электродам напряжение регулируется независимо от колебаний напряжения питающей сети. При питании лампы от электронного устройства экономия электроэнергии за счет оптимизации приложенного напряжения составляет величину порядка 5-10%, увеличивается срок службы лампы. Кроме того, при использовании электронного стабилизатора КПД может достигать 93% (напомним, при использовании обычного индуктивного дросселя он не превышает 85%). Увеличивается также и коэффициент мощности (более 90%).

Однако без недостатков не обходится и в этом случае. Электронная аппаратура (⇒ Рис. 38) имеет в своем составе диодный мост с емкостным фильтром, что приводит к броску тока при включении устройства. Во время работы в кривой потребляемого тока за счет нелинейного характера схемы появляется третья гармоника (⇒ Рис. 39), имеющая высокий уровень. В этом случае без применения компенсирующих устройств коэффициент мощности электронного устройства ниже, чем при использовании обычного пускового устройства, и составляет величину порядка 55%.

Третья гармоника приводит к появлению тока в нейтральном проводнике. Подробно данный вопрос рассмотрен в «Cahier Technique 202: The singularities of the third harmonic».

В электронной пускорегулирующей аппаратуре обычно предусмотрена емкость компенсации высокочастотных помех, включенная между питающим проводником и «землей». Через эти компенсирующие емкости возникает постоянный ток утечки, равный приблизительно 0.5 – 1 мА на одно устройство. При установке УЗО это может ограничивать количество установленных единиц пусковой аппаратуры. См. «The Cahier Technique 114 Residual Current Device in LV».

3.8 Клапаны и электрические винтовые механизмы

■ Вступление

Для того, чтобы завершить обзор устройств, которые могут быть включены в состав автоматизированных систем управления технологическими процессами, необходимо кратко упомянуть о широко используемых механизмах: электрических устройствах позиционирования с винтовым механизмом и электромагнитных клапанах.

По требованиям технологического процесса инструмент либо изделие должно перемещаться и позиционироваться с определенной степенью точности. Достаточно часто используются пневматические и гидравлические системы позиционирования, однако, могут применяться и электромеханические системы. Их мы и рассмотрим в дальнейшем. Отметим также, что устройства перемещения и позиционирования конструктивно могут быть встроены в электродвигатели или связаны с регулирующими устройствами, например, для регулирования по положению. Существует огромная потребность в устройствах для управления потоками жидкости или газа. Эти устройства могут использоваться для следующих применений:

- прекращение протекания потока (запорные клапаны);
- изменение направления потока (трехходовые клапаны);
- перемешивание потоков (смесители);
- управление потоком (регулирующие клапаны).

■ Электрические винтовые механизмы

Винтовые устройства используются в производственных процессах для обеспечения линейных перемещений приводных механизмов. При этом предъявляются очень жесткие требования к точности, надежности, быстродействию и сроку эксплуатации.

Производители оборудования в настоящее время могут предложить электрические винтовые устройства, удовлетворяющие практически любым требованиям.

□ Составные части электрического винтового устройства

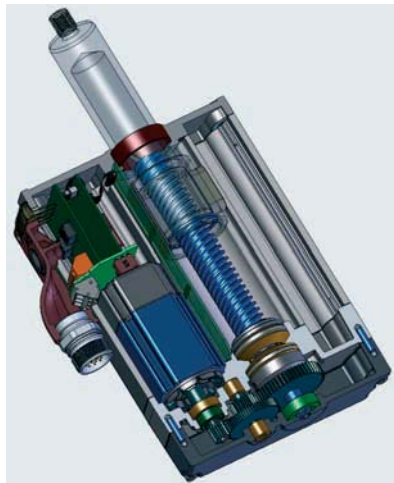
Электрический винтовой механизм состоит из электродвигателя, передаточного звена, стального винта, имеющего резьбу прямоугольного или трапецеидального сечения и направляющей, рабочего звена. На фотографии (⇒ Рис. 40) показан винтовой механизм для линейного перемещения. Перемещение рабочего звена может быть как вращательным, так и линейным. Для преобразования вращательного движения винта в линейное перемещение направляющей обычно используется передача «винт-гайка».

Две наиболее распространенных системы – это шариковая винтовая пара и винт-гайка скольжения.

Передача винт-гайка скольжения состоит из вращающегося стального винта и гайки из пластика.



↑ Рис. 40 Электрический винтовой механизм



↑ Рис. 41 Электрический механизм с шариковой винтовой парой

При очевидной экономичности конструкции эта передача обладает полезным свойством – отсутствие заклинивания при совместном взаимодействии пластика и металла.

Передачи «винт-гайка скольжения» работают бесшумно, а значит могут использоваться в больницах, офисах и т.д.

Еще одно ценное качество системы «винт-гайка» – высокий коэффициент трения. Этот тип передачи особенно хорошо подходит для механизмов, где есть необходимость эффекта самоторможения, то есть отсутствия движения в обратную сторону после снятия вращающего момента. В качестве примера можно привести использование винтовой пары для регулировки высоты стола. Применение передачи «винт-гайка скольжения» обеспечивает неизменную высоту стола при воздействии нагрузки. При этом не требуется использовать внешний тормоз или блокирующий механизм для сохранения положения стола по вертикали.

Привод с шариковой винтовой парой (ШВП) используется при необходимости получения высоких эксплуатационных характеристик (⇒ Рис. 41). В нем между гайкой и винтовой поверхностью находится определенное количество стальных шариков в замкнутой системе. Механизм такого типа обладает очень низким коэффициентом трения между гайкой и винтом благодаря контакту качения между шариками, гайкой и направляющими.

Износ механизма при этом меньше по сравнению с механизмом «винт-гайка скольжения» и срок службы при одинаковых условиях эксплуатации ШВП до 10 раз больше. При этом сроке службы шариковая винтовая пара может работать с большими нагрузками и длительным временем цикла. Невысокий коэффициент трения делает шариковую винтовую пару особенно эффективной, поскольку она не перегревается.

Механизмы с шариковой винтовой парой используются при необходимости продолжительной работы с высокими скоростями. При этом люфт системы крайне незначителен, что позволяет использовать ее, в том числе, и для систем позиционирования, где требования к точности являются решающими.

□ Семейства изделий

Электрические винтовые устройства изготавливаются самых разнообразных форм и размеров, чтобы легко интегрироваться в различное промышленное оборудование. Кроме того, ряд производителей предлагает дополнительно устройства управления винтовыми механизмами, что упрощает работу. На фотографии на Рис. 42 приведён ряд изделий, предлагаемых компанией SKF.

□ Руководство по выбору

Правильный выбор электрического винтового механизма часто требует детальных знаний о предстоящем использовании и проведения некоторых расчётов. Каталоги изготовителей могут помочь в первоначальном выборе, если известны хотя бы частичные данные (скорость перемещения, величина нагрузки и т.д.).

□ Двигатели, используемые для привода винтовых механизмов

Выбор привода осуществляется производителем оборудования. Для управления винтовым механизмом применяются:

- двигатели постоянного тока;
- асинхронные двигатели;
- бесщёточные синхронные двигатели;
- шаговые двигатели.

Двигатели постоянного тока обычно низковольтные (от 12 до 24 В). Используются при необходимости перемещать рабочий орган со средней скоростью порядка 50 мм/с и нагрузке до 4000 Н. Такие винтовые механизмы используются в мобильных автономных устройствах с аккумуляторным питанием.

Асинхронные двигатели позволяют существенно увеличить преодолеваемую нагрузку до 50 000 Н и достичь скорости 80 мм/с. Такие винтовые механизмы применяются главным образом в стационарных устройствах.

При необходимости высокоскоростных перемещений (до 750 мм/с) используются бесщёточные синхронные двигатели. Преодолеваемое усилие при этом может составлять до 30000 Н.

Шаговые электродвигатели применяются при необходимости точного позиционирования устройства без отскока.



↑ Рис. 42 Электрические винтовые механизмы компании SKF

□ Дополнительное оборудование

• Встроенный контроллер

Некоторые электрические винтовые механизмы уже имеют встроенные управляющие устройства. В особенности это распространено в приводах с бесщеточными синхронными двигателями. Устройство управления может включать в себя регулятор скорости, управляемый по полевой шине системы автоматизации.

• Потенциометр

Это устройство используется для определения положения движущегося рабочего органа и его точной установки.

• Устройство тепловой защиты

Предназначено для защиты двигателей и модулей управления от перегрева.

• Энкодер

Это датчик, который при подключении к устройству управления выдает сигнал о положении вращающегося механизма.

• Ограничители предельной нагрузки

Ряд типов винтовых механизмов оснащены механическими устройствами безопасности, аналогичными фрикционным муфтам сцепления для защиты двигателя и редуктора от поломки.

• Концевые выключатели

Эти выключатели срабатывают при достижении механизмом предельного положения. Содержат замыкающие и размыкающие электрические контакты. Концевые выключатели могут быть любой формы и размера и могут располагаться как внутри, так и снаружи винтового механизма.

Эти устройства безопасности являются частью системы управления, и очень важно контролировать их сигналы при использовании электрических винтовых механизмов в системах автоматизации и различных установках.

• Механический контроль заклинивания

Это устройство безопасности позволяет прекратить работу винтового механизма при наличии чрезмерного момента сопротивления на валу. Основное предназначение – защита персонала от травм.

• Электрический контроль заклинивания

Это функция обеспечивающая безопасность на некоторых электрических винтовых механизмах.

Она прерывает питание двигателя в случае приложения внешней ударной нагрузки в направлении, противоположном ходу винта.

■ Клапаны

Описание работы клапанов и соответствующих систем управления выходит за рамки данного Руководства. Однако, поскольку клапаны могут быть частью системы автоматизации такой же, как звенья регулирования, регуляторы скорости, будет полезно иметь представление об их конструкции и принципах действия.

□ Структура клапана

Клапан (⇒ Рис. 43) состоит из корпуса и заслонки, которая прижимается к седлу. Поток жидкости управляется работой штока. Шток, в свою очередь, приводится в действие электрическим или пневматическим устройством.

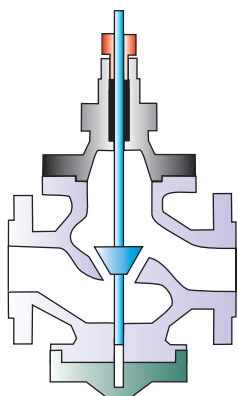
Большинство клапанов имеют либо пневматическое, либо электрическое управление (электромагнитные клапаны).

Существует множество конструкций клапанов (бабочка, сферический, диафрагменный и т.д.) для различных применений, взаимосвязи потока жидкости и хода штока (выход жидкости в зависимости от положения заслонки или величины управляющего сигнала для регулируемых клапанов).

Конструкция запорного элемента (заслонки) имеет специальную форму для предотвращения или уменьшения нежелательных явлений. К таким явлениям можно отнести гидравлический удар и кавитацию.

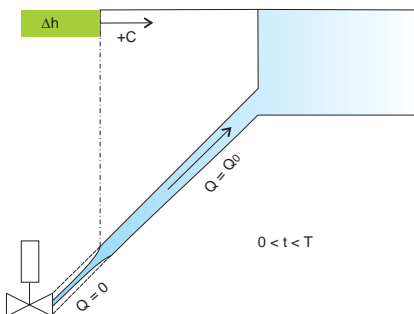
• Гидравлический удар

Это явление может происходить в гидравлических системах при закрытии клапана. Поток жидкости в трубе внезапно останавливается и приводит к явлению, известному как гидравлический удар.

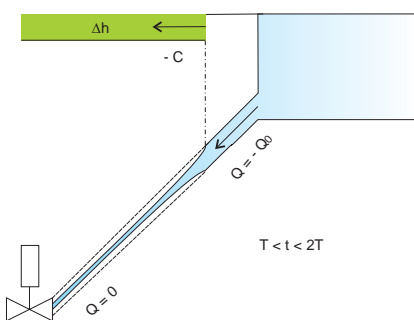


↑ Рис. 43

Поперечное сечение клапана



↑ Рис. 44a Гидравлический удар (начало)



↑ Рис. 44b Гидравлический удар

В качестве примера (⇒ Рис. 44a и 44b) рассмотрим насосную станцию, питающую резервуар, который расположен выше подающего насоса.

Когда сливной вентиль закрывается, вода выливается вниз из резервуара через насос, а водяной столб ниже насоса стремится продолжить своё движение до тех пор, пока не пропадёт напор от насоса. Это движение вызывает упругую деформацию трубы, которая сжимается в точке, близкой к вентилю. Масса жидкости временно поддерживается в движении. Происходит разрежение, которое распространяется по трубе со скоростью упругих волн C до входного отверстия за время $T = L / C$, где L – длина трубы между вентилем и выходным отверстием.

Результат состоит в том, что давление там, где труба входит в резервуар, меньше, чем давление в резервуаре, что вызывает противоток. Волна распространяется от резервуара до насосной станции и достигает заслонки вентилея через интервал $2T$ от начала явления.

Столб жидкости продолжит своё снижение и опять ударит по закрытому вентилею, вызывая вздутие трубы и изменение направления движения жидкости.

Гидравлический удар длился бы бесконечно, если бы потери в нагрузке при разрежении и при избыточном давлении постепенно не гасили бы его.

Для того чтобы избежать этого потенциально разрушительного явления, работой вентилея должна управлять система, выполняющая постепенное закрытие с тем, чтобы удерживать избыточное давление и разрежение в приемлемых пределах.

Другая процедура предполагает постепенное снижение скорости питающего насоса, позволяющее вентилею перекрыть трубу.

В случае насоса, работающего с постоянной скоростью, наиболее подходящим является устройство плавного пуска, такое как Altistart или Altivar для насосов с регулированием скорости.

• Кавитация

Закрытие клапана приводит к уменьшению сечения, доступного для протекания жидкости (⇒ Рис. 45). Согласно теореме Бернулли уменьшение сечения для протекания жидкости в результате прикрытия клапана ведёт к ускорению потока и уменьшению статического давления в этой точке.

Величина падения статического давления зависит от:

- внутренней геометрии клапана;
- величины статического давления за клапаном.

Давление при открытом клапане показано в виде кривой 1 (⇒ Кривая 1).

Ограничение потока в точке закрытия горловины клапана приводит к падению давления и ускорению потока (эффект Вентури (Venturi)).

При закрытии горловины влияние эффекта Вентури возрастает, и кривая 1 постепенно трансформируется в кривую 2 (⇒ Кривая 2).

Когда статическое давление жидкости в трубе достигнет точки кипения, соответствующей температуре жидкости в гидросистеме, происходит возникновение пузырьков кипения в потоке жидкости.

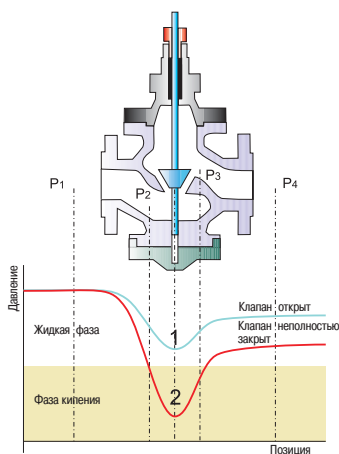
Когда статическое давление на выходе клапана (давление P_2) вновь возрастет, кипящие пузырьки начнут сжиматься.

Кавитация обладает следующими нежелательными эффектами:

- недопустимо громкий звук, похожий на перекачивание гравия в трубах;
- высокочастотные вибрации, приводящие к откручиванию крепежных изделий на клапане;
- быстрое разрушение горловины, седла и корпуса клапана из-за выбивания частиц металла (поверхности, подвергшиеся кавитации, становятся шероховатыми);
- клапан начинает вести себя как постоянно открытый.

Как правило, клапанам часто приходится работать в течение длительного времени в условиях кавитации, и это сильно влияет на срок эксплуатации.

Рассмотрение способов ограничения или предотвращения кавитации выходит за рамки данного пособия.



↑ Рис. 45 Эффект кавитации