



# БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

В статье рассматриваются проблемы создания прямого (безредукторного) электропривода для трубопроводной запорной и запорно-регулирующей арматуры. Описываются варианты построения прямого привода трубопроводной арматуры на базе вентильного и вентильно-индукторного электропривода.

А. Т. Антропов, компания ЭлеСи

**Д**ля механизированного и автоматизированного управления трубопроводной арматурой применяются приводы различных типов (электрические, пневматические и гидравлические), однако наиболее распространены в настоящее время электрические. Это обусловлено следующими факторами:

- относительной простотой и гибкостью доставки электрической энергии к месту потребления;
- высоким коэффициентом полезного действия (КПД) электрических двигателей;
- большим количеством типов и практически неограниченным диапазоном мощности серийно выпускаемых электродвигателей;
- простотой реализации дистанционного и автоматического управления;
- приемлемой стоимостью электродвигателей.

При этом следует отметить, что оптимальные характеристики электродвигателей достигаются при частотах вращения ротора от нескольких сотен до нескольких тысяч оборотов в минуту. В то же время требуемая частота вращения приводного вала трубопроводной арматуры не превышает одного-двух десятков оборотов в минуту, а в некоторых случаях и вовсе может составлять доли оборота в минуту.

Для снижения частоты вращения до требуемого уровня в состав электропривода трубопроводной арматуры вводится механический редуктор, который, помимо этого, выполняет еще одну полезную функцию. Он повышает крутящий момент, прикладываемый к приводному валу трубопроводной арматуры.

Сочетание электродвигателя с редуктором обычно называется исполнительным механизмом. В электрических исполнительных механизмах для трубопроводной арматуры используются редукторы различных типов: червячные, цилиндрические, планетарные, волновые. Наиболее широко применяется червячный редуктор. Это обусловлено наличием у него такого полезного свойства, как способность к самоторможению.

Однако редуктор не только придает исполнительному механизму положительные качества, но и существенно снижает его КПД, увеличивает общий момент инер-

Тип исполнительного механизма	Масса, кг			$m_{дв} / m_p$
	Всего механизма	Редуктора ( $m_p$ )	Электродвигателя ( $m_{дв}$ )	
МЭО-10 / 25-0,25	26	21	1,5	0,07
МЭО-25 / 25-0,25	30	21	5,8	0,276
МЭО-63 / 25-0,25-68	95	77	11	0,143
МЭО-63 / 25-0,25K-68	90	77	4,3	0,056
МЭО-160 / 25-0,25	185	140	30	0,251
МЭО-160 / 25-0,25K	155	140	4,3	0,03

Таблица 1

ции, вносит люфты и упругие соединения. Главное же — он увеличивает габариты и массу. В некоторых случаях его масса может достигать 80 % от общей массы механизма. В качестве примера можно привести соотношение массы электродвигателя и редуктора в популярных электроприводах типа МЭО (см. Таблицу 1 [1]).

В связи с этим разработчики электроприводов всегда стремились исключить редуктор из состава электропривода или хотя бы уменьшить число ступеней редукции. До недавнего времени сделать это было весьма непросто. Понижение номинальной скорости вращения ротора электродвигателя достигалось при существенном ухудшении массогабаритных показателей и увеличении стоимости. Например, двигатель для привода рольганга мощностью 1 кВт с номинальной скоростью вращения 200 об/мин всего в 2,6 раза легче двигателя общепромышленной серии мощностью 160 кВт с номинальной скоростью вращения 3 000 об/мин при соответствующей стоимости. Это обусловлено тем, что пониженная скорость вращения двигателя достигалась за счет увеличения числа пар полюсов статора, что автоматически влекло за собой рост массы активных материалов и габаритов двигателя.

Попытки применения в безредукторном электроприводе специальных машин (например, двигателей с катящимся ротором или машин двойного движения) только усложняли конструкцию, но не способствовали уменьшению габаритов и стоимости электропривода в целом. Вследствие этого электрические машины специальных исполнений использовались в безредукторных электроприводах ограниченно, — когда чисто конструктивные соображения превалировали над экономическими.

Регулируемые электроприводы как постоянного, так и переменного тока также применялись достаточно ограничено, — в случае если требования технологическо-

го процесса не оставляли проектировщикам выбора.

Однако в последние два десятилетия ситуация существенно изменилась. Прежде всего, появились достаточно тихходные и высокомоментные электродвигатели, а также малогабаритные электронные преобразователи электрической энергии приемлемой стоимости. Речь идет о переключаемых реактивных двигателях, синхронных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов и статических преобразователях частоты на базе IGBT-транзисторов.

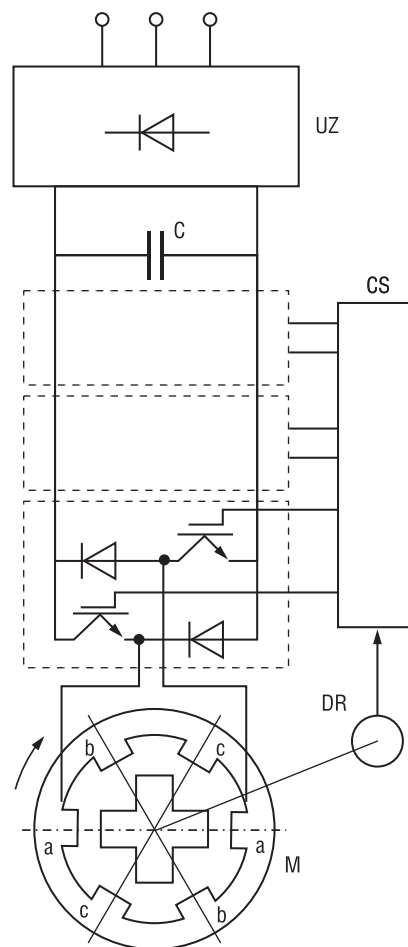
Переключаемый реактивный двигатель (в отечественной литературе — «вентильно-индукторный») является частным случаем синхронного реактивного двигателя с явно выраженными полюсами статора, на которые надеты катушки возбуждения, подобные катушкам полюсов электрических машин постоянного тока. Обмотка ротора отсутствует. Ротор выполнен в виде зубчатого колеса, при этом число его полюсов, т. е. зубцов, не равно числу явно выступающих полюсов статора. В отличие от асинхронных и синхронных двигателей, в переключаемом реактивном двигателе электромагнитный момент создается не в результате взаимодействия между вращающимся магнитным полем статора и токами ротора, а за счет несимметрии магнитной системы.

Машина управляется транзисторным коммутатором (см. Рис. 1 [6]), переключающим обмотки статора (индукторов). Основная особенность вентильно-индукторных приводов заключается в том, что индукторы переключаются в соответствии с положением ротора с помощью датчика положения DR.

Принцип работы вентильно-индукторного привода состоит в поочередном последовательном включении индукторов (а — а, в — в, с — с), поток которых замыкается через зубцы ротора. Возбуждение индуктора создает электромагнитные силы

притяжения между зубцами индуктора и ближайшими к ним зубцами ротора. Под действием этих сил (момента) ротор поворачивается и занимает такое положение, при котором его зубцы устанавливаются

Рис. 1. Структурная схема вентильно-индукторного электропривода



## ◀ Безредукторный электропривод трубопроводной арматуры

напротив зубцов возбужденной фазы. Так как число зубцов статора и ротора различно, то в том положении, которое является согласованным для одного индуктора, для следующего индуктора зубцы ротора окажутся в несогласованном положении. Вследствие этого при отключении первого индуктора и включении последующего ротор снова повернется на одно полюсное деление. Последовательная коммутация индукторов с помощью датчика положения через систему управления СС обеспечивает непрерывное создание вращающего момента и, следовательно, непрерывное вращение ротора двигателя.

Вентильно-индукторные электроприводы характеризуются конструктивной простотой и экономичностью. Они находят применение для общепромышленных механизмов мощностью от единиц до сотен кВт, к качеству регулирования которых не предъявляются высокие требования. Особенно эффективно их использование для механизмов с низкой либо, наоборот, с высокой (6 000 об/мин и выше) номинальной частотой вращения.

Весьма перспективно применение вентильно-индукторного электропривода и в исполнительных механизмах для трубопроводной арматуры. Действительно, темп переключения индукторов может быть сколь угодно низким. Все зависит от требований к плавности хода приводимого в движение механизма. В случае трубопроводной арматуры такие требования невысоки. Это позволяет отказаться от редуктора полностью либо существенно сократить число ступеней редукции.

Значение электромагнитного момента в переключаемом реактивном двигателе определяется средним значением тока, подаваемого в обмотки индукторов. Таким образом, момент двигателя можно регулировать, изменяя напряжение, подводимое к обмоткам индуктора. Следовательно, повышенный момент при отрыве или затягивании запорного органа, момент во время движения, а также фиксирующий момент после остановки запорного органа трубопроводной арматуры можно сформировать достаточно простым способом.

Синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов появились в конце 40-х годов прошлого века, практически одновременно с транзисторами. Как правило, это были микромашины, поскольку удельная энергия постоянных магнитов в то время была невелика. На

базе указанных синхронных электродвигателей и транзисторов стали создаваться так называемые вентильные двигатели. Однако до 70-х годов прошлого столетия вентильные двигатели с постоянными магнитами практически не применялись из-за отсутствия постоянных магнитов с высокой удельной энергией. Создание постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов (SmCo, NdFeB), имеющих удельную энергию 200–400 кДж/м<sup>3</sup>, позволило разработать синхронные двигатели малой мощности, лучшие по массогабаритным показателям, чем двигатели постоянного тока. Со второй половины 80-х годов прошлого века появились предпосылки для создания вентильных двигателей средней мощности на основе новых полупроводниковых приборов (IGBT- и MOSFET-транзисторов) и сравнительно недорогих постоянных магнитов NdFeB. В настоящее время вентильные двигатели на базе синхронных машин с постоянными магнитами и новых силовых полупроводниковых приборов прочно занимают место на рынке электроприводов.

Современный вентильный двигатель (см. Рис. 2 [5]) представляет собой электромеханическую систему, которая включает в себя полупроводниковый преобразователь электрической энергии (в рассматриваемом случае это автономный инвертор напряжения АИН-ШИМ, питающийся от трехфазной сети переменного тока через выпрямитель В), синхронный двигатель (СД) и датчик положения ротора

(ДПР). Известно большое число принципиальных схем вентильных двигателей [1, 2, 3]. Общим признаком для них всех является обратная связь по положению ротора. Сигнал обратной связи по положению ротора относительно положения обмоток статора формируется ДПР. Этот сигнал поступает в систему управления полупроводниковым преобразователем (СУ АИН) и используется для получения открывающих импульсов полупроводниковых ключей преобразователя, коммутирующих обмотки статора в требуемой последовательности. При этом в обмотках статора СД формируются такие мгновенные значения токов, которые при данном положении вращающегося ротора обеспечивают расположение результирующего вектора магнитодвижущей силы (МДС) статора перпендикулярно вектору МДС ротора. Такое управление позволяет получить максимальный электромагнитный момент двигателя. Другими словами, вентильный двигатель – это электродвигатель переменного тока, обмотки статора которого питаются от преобразователя частоты, коммутирующего ток в функции угла поворота ротора с частотой, соответствующей угловой скорости ротора.

В вентильных двигателях для управления положением результирующего вектора МДС статора относительно вектора МДС вращающегося ротора используют два способа:

- непрерывный, при котором по сигналу непрерывного датчика положения ротора (резольвера или энкодера) форми-

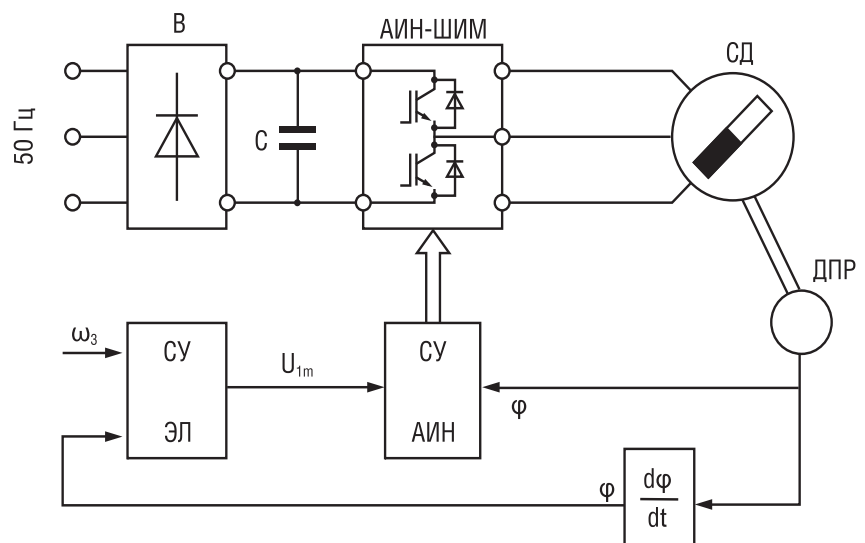


Рис. 2. Структурная схема вентильного электродвигателя

руется требуемый алгоритм коммутации силовых ключей инвертора, обеспечивающий заданное положение вектора МДС статора относительно вектора МДС ротора;

- дискретный, при котором по сигналам дискретного датчика положения ротора (например, на основе датчиков Холла) в заданных точках положения ротора осуществляется коммутация требуемых фаз обмотки статора и дискретное перемещение вектора МДС статора.

Для непрерывного и дискретного способов управления применяются соответствующие алгоритмы переключения силовых ключей инвертора.

При непрерывном способе управления положением вектора МДС статора применяется такой алгоритм коммутации ключей, при котором инвертор формирует трехфазную симметричную систему синусоидального тока, строго синхронную с положением ротора. В каждый момент времени в инверторе открыты три ключа и по всем трем фазам обмотки статора проходит ток. Интервал работы каждого ключа составляет 180 электрических градусов за период изменения выходного напряжения инвертора. При синусоидальных обмотках статора ВД и таком управлении вектор МДС плавно перемещается вдоль поверхности статора двигателя. Вентильные двигатели с непрерывным управлением положением вектора МДС статора получили название синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Иногда их называют бесконтактными двигателями переменного тока. Для управления электрическими величинами СДПМ применяют векторные способы.

При дискретном способе управления положением вектора МДС статора используют такой алгоритм переключения силовых ключей, при котором инвертор формирует в фазах двигателя переменный ток прямоугольной формы. В каждый момент времени в инверторе открыты два ключа и ток протекает по двум фазам обмотки статора, включенным последовательно. Интервал работы каждого ключа составляет 120 электрических градусов за период изменения выходного напряжения инвертора. При дискретном способе управления вектор МДС статора перемещается дискретно относительно поверхности статора. Вентильные двигатели с дискретным управлением положением вектора МДС статора получили название бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ). Для управления переменными величинами БДПТ используют скалярные способы.

Ряд качеств вентильных двигателей с постоянными высокоэнергетическими магнитами делает привлекательным их использование в безредукторных электроприводах,

в том числе трубопроводной арматуры.

Во-первых, это способность вентильных двигателей развивать существенные крутящие моменты на низких скоростях вращения.


Во-вторых, большая перегрузочная способность по току и крутящему моменту (до пяти- и более кратной) и, как следствие, возможность развивать большие ускорения.

В-третьих, электропривод на базе вентильного двигателя с постоянными высокоэнергетическими магнитами обладает остаточным фиксирующим моментом в отключенном состоянии (до 30 % от номинального крутящего момента).

В ЗАО «ЭлеСи» создан опытный образец многооборотного электропривода запорной арматуры типа А (см. Рис. 3) на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Система управления опытного электропривода позволяет реализовывать как СДПМ, так и БДПТ. Редуктор в его составе отсутствует.

По массогабаритным и стоимостным показателям опытный безредукторный электропривод находится между аналогичными с червячным и волновым редуктором. Массогабаритные показатели у него лучше, чем у электропривода с червячным редуктором, и несколько хуже, чем у электропривода с волновым редуктором на промежуточных теллах качения. Со стоимостными показателями все наоборот.

В то же время эксперименты демонстрируют, что в нем полностью отсутствуют люфты и упругие соединения. Он характеризуется лучшей динамикой, нежели приводы с редуктором, а также несравнимо большей точностью позиционирования.

Уже на этом этапе можно констатировать, что безредукторный электропривод трубопроводной арматуры на базе вентильного двигателя с постоянными высокоэнергетическими магнитами вполне конкурентоспособен, особенно в рыночном сегменте запорно-регулирующей арматуры. 



**Рис. 3. Опытный образец безредукторного многооборотного электропривода типа А**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов // **В. Д. Косунин, Г. Б. Михайлов, В. В. Омельченко, В. В. Путников.** – Л.: Энергоатомиздат, 1988.
2. **Овчинников И. Е.** Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) // М.: Издательский центр «Академия», 2006.
3. **Зиннер Л. Я., Скороспешкин А. И.** Вентильные двигатели постоянного и переменного тока // М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. **Свечарник Д. В.** Электрические машины непосредственного привода // М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. **Фираго Б. И., Павлячик Л. Б.** Регулируемые электроприводы переменного тока // Мн.: Техноперспектива, 2006.
6. **Онищенко Г. Б.** Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений // М.: Издательский центр «Академия», 2006.