

# Обзор современных систем управления электроприводами

Дмитрий Кобяков (г. Нижний Новгород)

В статье рассмотрены наиболее распространённые электродвигатели современных электроприводов, принцип их работы и конструкция. Приводятся примеры применения и ключевые моменты методов управления разными видами двигателей, в зависимости от их конструкции. Приведён обзор современной элементной базы, представлена топология силовой части электроприводов малой и большой мощности.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных тенденций развития современной электротехники является разработка эффективных регулируемых систем электропривода. Современные системы управления электроприводов, как правило, цифровые с интеллектуальными силовыми ключами. Этому способствовало развитие микроэлектроники, а также силовой электроники. На данный момент под электроприводом можно понимать однокристалльную систему управления в совокупности с силовым автономным инвертором напряжения и электродвигателем. Такой электропривод представляет собой единый мехатронный модуль движения.

## Виды двигателей и их конструкция

Рассмотрим три распространённых вида электродвигателей: синхронный с постоянными магнитами, бесколлекторный двигатель постоянного тока и асинхронный с короткозамкнутым ротором. За рубежом эти двигатели называются так:

- BLDC (Brushless Direct Current Motor) – бесколлекторный двигатель постоянного тока;

- PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine) – синхронный двигатель с постоянными магнитами;
- AC Motor (Alternating Current Motor) – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Начнём с двигателя BLDC. У него, кроме озвученного, есть много других названий: и бесколлекторный двигатель постоянного тока (BLDC), и бесщёточный электродвигатель, и вентильный электродвигатель. Конструктивно он представляет собой синхронный двигатель с постоянными магнитами, то есть роль индуктора выполняют постоянные магниты, а не обмотка возбуждения.

Любой электродвигатель имеет статор и ротор. Статор – неподвижная часть конструкции, ротор – вращающаяся ее часть. По данному критерию двигатели можно разделить на два типа (см. рис. 1):

- Inrunner – магнитные пластины ротора расположены внутри статора;
- Outrunner – магнитные пластины ротора закреплены снаружи и вращаются вокруг неподвижного статора.

Из рисунка 1 видно, что схему Inrunner целесообразнее применять для высокооборотных двигателей

с малым числом полюсов. Из конструкции Outrunner, при желании, можно сделать электродвигатель с высоким вращающим моментом и относительно малыми оборотами. Геометрия Inrunner конструктивно проще, так как за статор можно закрепить электродвигатель. В случае конструкции Outrunner внешняя часть будет вращаться. Такой двигатель закрепляют за неподвижную часть. Ротор PMSM может включать в себя постоянные магниты или обмотку возбуждения. Постоянные магниты – это изделие из магнитотвёрдого материала с высокой коэрцитивной силой.

Геометрия ротора синхронного двигателя, как и любого другого электродвигателя, бывает:

- с явно выраженными полюсами;
- с неявно выраженными полюсами.

Если представить статор двигателя во вращающейся системе координат d–q, то получится, что конструкция с неявно выраженными полюсами имеет одинаковую индуктивность по продольной и поперечной осям  $L_d = L_q$ , а у конструкции с явно выраженными полюсами это не так –  $L_d \neq L_q$ . Этот момент очень важен, к нему мы вернёмся позже. Статор электродвигателя включает в себя корпус и сердечник с обмоткой. Широко применяются трёхфазные PMSM. Конструкция статора любого электродвигателя бывает (см. рис. 2):

- с распределённой обмоткой;
- с сосредоточенной обмоткой.

Бесколлекторные электродвигатели с тремя фазами являются самыми распространёнными. Количество фаз

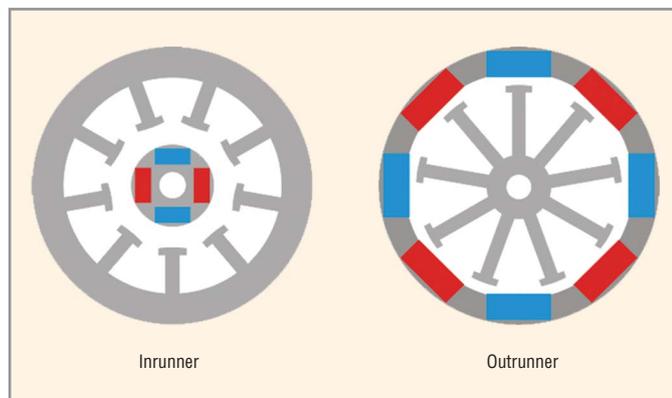


Рис. 1. Двигатели конструкции Inrunner и Outrunner

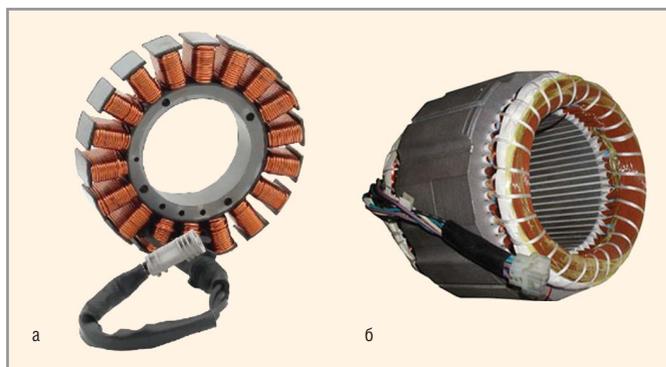


Рис. 2. Внешний вид статора: а – с распределённой обмоткой; б – с сосредоточенной обмоткой

может быть разным. С увеличением количества фаз растёт плавность вращения ротора, но становится сложнее алгоритм управления. Трёхфазная обмотка является самой подходящей по критериям простоты и КПД, поэтому она очень распространена. Под эту систему выпускаются готовые силовые транзисторные сборки. На рисунке 3 показаны обмотки со схемой соединения «треугольник» и «звезда».

Теперь сравним двигатель постоянного тока и BLDC (см. рис. 4). Современной альтернативой щёточным ДПТ являются электроприводы с вентильными, т.е. электронно-коммутируемыми двигателями. У такого двигателя нет щёток и механических контактов, поэтому его ресурс очень велик и ограничен, по сути, только ресурсом подшипников. Функцию коллектора (переключателя фаз) у вентильного электродвигателя выполняет транзисторный преобразователь.

BLDC-двигатель меньше весит и менее габаритный. Если сравнивать потери в электроприводе на базе ДПТ и BLDC, то во втором случае они ощутимо меньше. Дело в том, что потери мощности в электроприводе можно условно разделить на транзисторные и коллекторные. У вентильного двигателя коллектора нет, поэтому КПД такого привода выше. О диапазоне изменения скорости тут трудно судить однозначно. У ДПТ есть обмотка возбуждения, и увеличение скорости выше номинальной достигается за счёт уменьшения потока возбуждения. У BLDC таковой нет, то есть максимальная скорость – это номинальная скорость вращения. Так что здесь, если оба привода имеют датчики обратной связи по скорости, диапазон вращения шире у ДПТ.

Также бесколлекторные двигатели греются меньше, чем ДПТ. Вентильные

двигатели в принципе греются меньше, чем их коллекторные оппоненты: ДПТ, универсальный коллекторный двигатель, ВИД с независимым возбуждением. Статор и обмотка возбуждения у мощных приводов нуждаются в охлаждении при длительной работе. Применяют разные способы охлаждения: водяной или воздушный. При этом немного меняется внутренняя топология двигателя. У BLDC же, как и у PMSM, нет обмотки возбуждения. Следовательно, охлаждать надо только статор. Например, интересное решение применили инженеры фирмы Azipod в своих ВРК (вентильно-рулевая колонка). Azipod – фирма, которая выпускает азимутальные подруливающие устройства для различных классов судов, в том числе и для дизель-электрических ледоколов (см. рис. 5).

ВРК системы Azipod представляет собой мощный (несколько мегаватт) электропривод на базе PMSM. Преимущества такой системы в том, что статор охлаждается за счёт обтекания корпуса ВРК водой, а в роторе установлены постоянные магниты, не нуждающиеся в охлаждении. Недостаток такой системы – ремонтпригодность. Двигатель находится в гондole под водой, то есть в труднодоступной зоне. Поэтому сейчас такие системы постепенно вытесняются гибридными пропульсивными установками, где электродвигатель находится в вертикальном положении. Таким образом, достигается компромисс между потерями в передаточных механизмах и доступностью двигателя и возможностью его замены (см. рис. 6).

Ещё одним плюсом вентильных приводов является возможность эксплуатации в воде и агрессивной среде. Это преимущество, к примеру, активно используется в военной промышленности, в автомобильных приводах. Как правило, синхронный двигатель

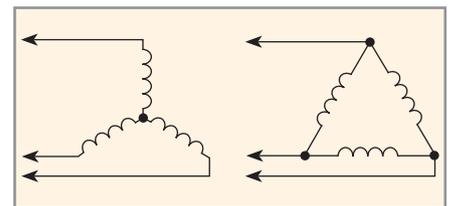


Рис. 3. Варианты соединения обмоток

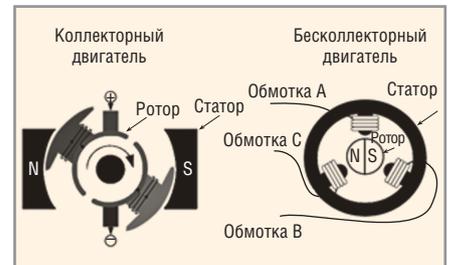


Рис. 4. Конструктивное отличие двигателя постоянного тока от BLDC

используется там, где инвертор питается от сети с одной (см рис. 7) или тремя фазами. То есть 220 или 380 В, соответственно.

BLDC – это, в основном, маломощные приводы с питанием АИН до 48 В. Нет смысла понижать 310 В до 24 В, к примеру. Поэтому там, где сеть переменного тока, используют PMSM, а там, где питание ведётся от постоянного тока (аккумулятор автомобиля), используют BLDC (см. рис. 8). Следует отметить, что ДПТ очень популярен в тяговых приложениях. Самый яркий пример – троллейбус. Поэтому есть отдельная развивающаяся ниша мощных BLDC, как альтернатива тяговым ДПТ. На рисунке 7 видно, как однофазное напряжение сети выпрямляется, а потом повышается за счёт обратногоходового импульсного преобразователя. Это схема для питания звена постоянного тока инвертора PMSM. Кстати, для увеличения мощности привода целесообразнее повышать напряжение питания электродвигателя, а не его



Рис. 5. Дизель-электрический ледокол «Норильский Никель» с пропульсивной системой Azipod

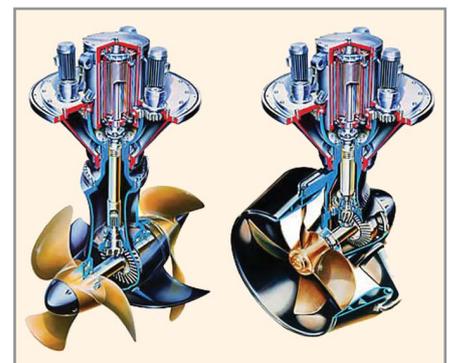


Рис. 6. Винторулевой комплекс Schottel Combi Drive

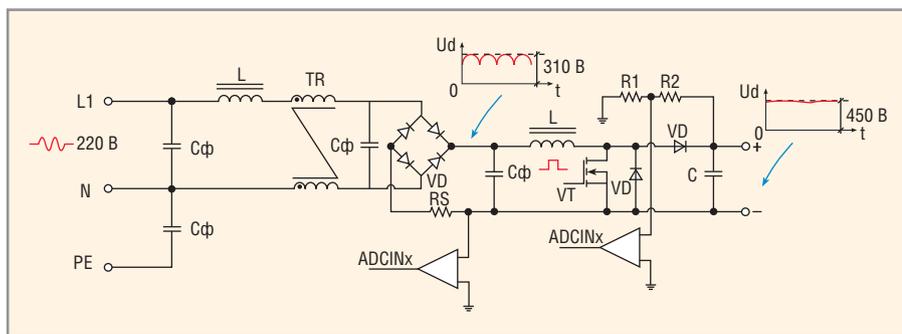


Рис. 7. Фрагмент принципиальной электрической схемы однофазного ПЧ

ток. Такой ИИП на рисунке 7 является одновременно и бустером, и ККМ. Но это уже отдельная область со своими топологиями, прерывистыми токами, датчиками, контурами компенсации и т.д.

К примеру, та же ВРК имеет силовой трёхуровневый АИН для увеличения напряжения питания электродвигателя (см. рис. 9).

Таким образом, единственным большим недостатком ВД можно считать сложный электронный блок управления и невозможность работы от сети напрямую. Если вам нужен регулируемый привод, то обязательно нужна цифровая система управления и АИН. Даже если задача не требует регулирования скорости, то в случае с BLDC или PMSM без платы управления и силовой части не обойтись. ВД без электроники – это просто железо в отличие от

ДПТ, универсального коллекторного двигателя или асинхронного электродвигателя. Их можно запускать от сети напрямую и регулировать обороты за счет добавочных сопротивлений в статоре, в обмотке ротора, меняя наклон естественной механической характеристики.

Несмотря на свою новизну вентильный электропривод, на самом деле, не является новинкой. Примерные алгоритмы работы и конструкция были придуманы в начале эры электрических двигателей. Например, в 1962 году выпустили первый BLDC. Но из-за низкого уровня вычислительных технологий BLDC не получил распространения. Синхронные двигатели занимали генераторную нишу. Для тяги больше подходили ДПТ. Например, в электрических дрелях, как и сейчас, применялись универсальные коллекторные двигате-

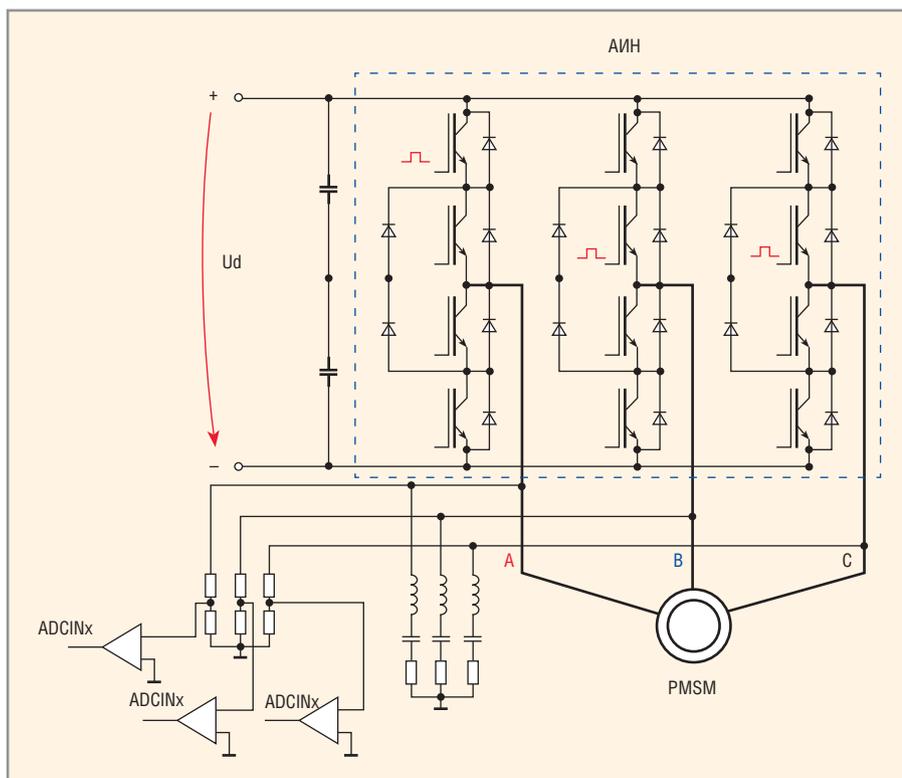


Рис. 9. Структурная схема трёхуровневого АИН



Рис. 8. Электродвигатель BLDC для автомобильных приложений в разобранном виде

ли, а самым распространённым двигателем был асинхронный.

Теперь поговорим об асинхронном электродвигателе, или AC motor. Он также имеет статор с тремя фазами, как и PMSM. Основным различием между PMSM и AC motor выступает ротор. Для управления также используется частотный преобразователь. Об алгоритмах и способах управления асинхронным двигателем будет рассказано ниже. Конструкция ротора состоит из цилиндра, который сделан из меди или алюминия. Внутри ротора находится железный магнитопровод и обмотка, замкнутая сама на себя, то есть накоротко. В роторе индуцируется переменное напряжение за счёт переменного магнитного поля статора. Вращающий (электромагнитный) момент – это результат взаимодействия вихревых токов в короткозамкнутом роторе с полем статора. Асинхронный электродвигатель сегодня является самым популярным. Он надёжен и требует мало обслуживания. В дополнение к этому он может запускаться напрямую от сети. ДПТ с большой мощностью от сети напрямую не запускают, так как возможен большой круговой огонь, который испортит коллектор. Их запускают с пониженного напряжения. Для этого можно разработать релейно-контакторную схему или выбрать тиристорный или транзисторный преобразователь. Не стоит забывать также о простоте конструкции, а значит о технологичности асинхронника, а также о его дешевизне.

### СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

При описании конструкции BLDC мы упомянули, что он устроен как PMSM. Но это не совсем так. Он устроен почти как PMSM. Дело в следующем. Синхронным двигателем с постоянны-

ми магнитами можно управлять в двух режимах:

- управление BLDC – режим автокоммутации с поддержанием фазного тока на заданном уровне на интервале коммутации.
- управление BLAC (PMSM) – векторный метод управления (FOC), который сегодня реализуется программно с помощью векторной ШИМ и координатных преобразований. Суть этого метода состоит в изменении частоты переменного трёхфазного напряжения, подаваемого на статор двигателя (см. рис. 10).

Когда синхронным двигателем управляют в режиме автокоммутации, его конструкция подразумевает однополярное питание при этом обмотки генерируют трапецеидальную противоЭДС. Ротор такого двигателя имеет явно выраженные полюса, что означает  $L_q \neq L_d$ . Такой двигатель называют бесколлекторным, или BLDC. Если речь идёт об управлении, ориентированном по полю (FOC), то двигатель генерирует синусоидальную противоЭДС. В роторе находятся неявно выраженные полюса. Такой двигатель называют синхронным, или PMSM. Для каждого двигателя есть свой метод управления. Точнее, конструкция сделана под метод управления.

Расскажем вкратце о методах управления BLDC и BLAC.

У обоих двигателей в роторе установлены постоянные магниты. Чтобы возник вращающий момент, нужно вращающееся магнитное поле статора, которое будет утягивать за собой ротор. В BLDC это сделано следующим образом. К АИН подводится постоянное напряжение и в каждый момент времени ток идёт только по двум фазам (см. рис. 11). Если речь идёт о 6-секторной ШИМ, то для того чтобы сделать один магнитный оборот, нужно перебрать шесть комбинаций транзисторных ключей (см. таблицу).

Различают такие понятия, как механическое вращение и электрическое (магнитное) вращение. Здесь всё зависит от числа полюсов в двигателе. Механическое и электрическое вращения зависят друг от друга:

$$n_{\text{mag}} = p \times n_{\text{мех}} \quad (1)$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя.

Рисунок 12 иллюстрирует изменение положения потокосцепления статора, в зависимости от комбина-

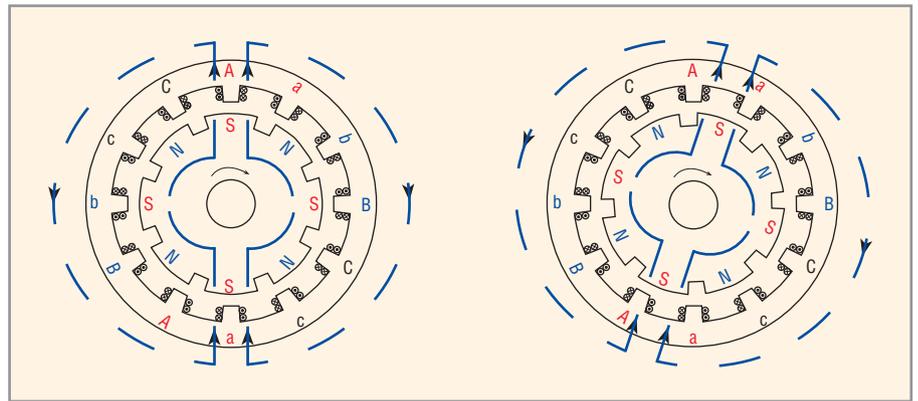


Рис. 10. Статор синхронного двигателя и вращающийся ротор с постоянными магнитами

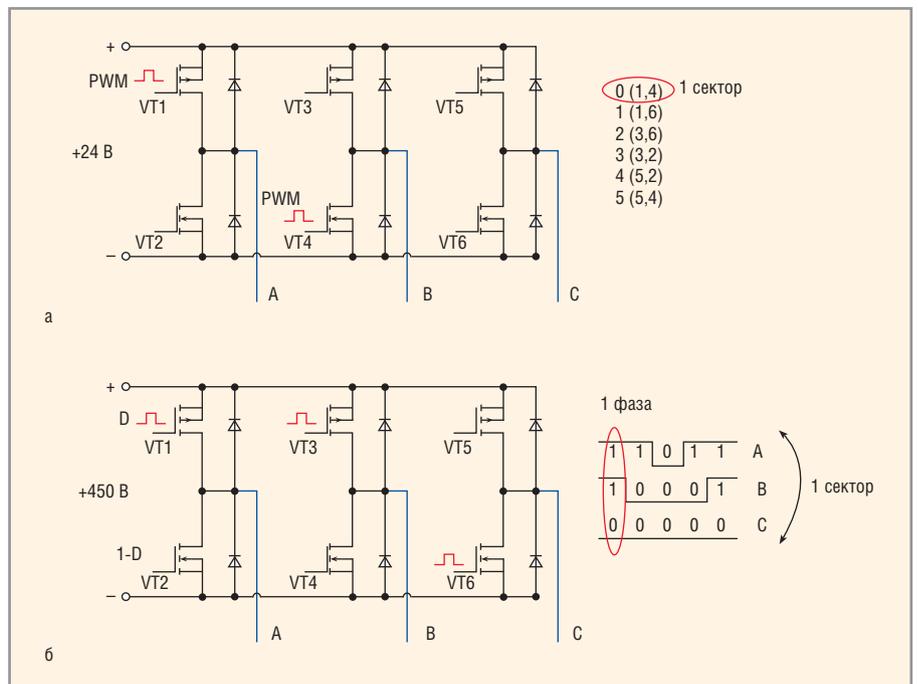


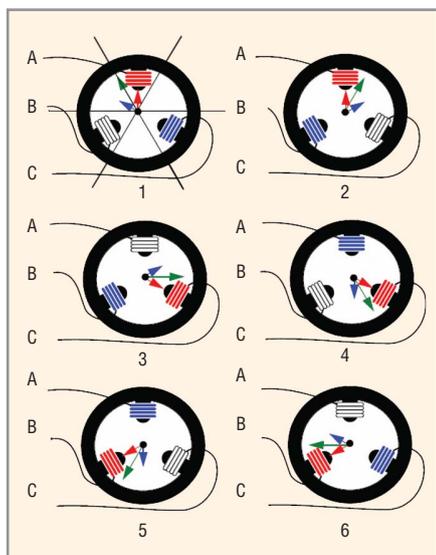
Рис. 11. Подача импульсов управления на ключи АИН: а – при обыкновенной ШИМ; б – при Space Vector ШИМ

Таблица коммутаций силовых ключей BLDC

Электрические градусы, °	Номер сектора	Сигналы PWM	Фазы		
			A	B	C
0–60	1	1,4	+	–	×
60–120	2	1,6	+	×	–
120–180	3	3,6	×	+	–
180–240	4	3,2	–	+	×
240–300	5	5,2	–	×	+
300–360	6	5,4	×	–	+

ции ключей. Для того чтобы поддерживать или регулировать скорость, нужно знать в какой момент переключить следующую комбинацию. Следовательно, необходимо знать положение ротора. Сразу стоит сказать, что бывают датчиковое и бездатчиковое управление любым электродви-

гателем. Бездатчиковое управление основано на вычислении положения ротора по противоЭДС обмоток статора. Датчиковое же управление подразумевает датчик положения ротора. Это могут быть датчики Холла, инкрементальный или абсолютный энкодер, резольвер.

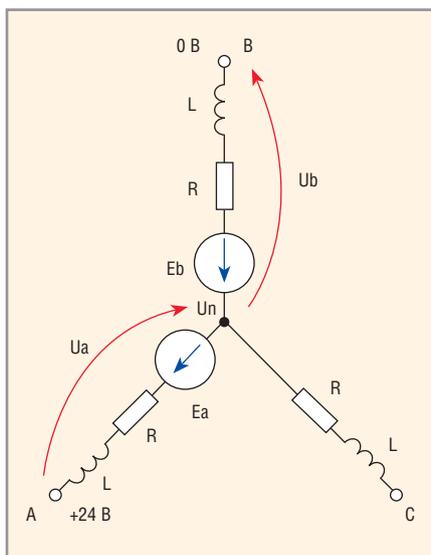


**Рис. 12.** Пояснение алгоритма переключения ключей BLDC

В качестве транзисторного моста используется АИН из шести ключей. Транзисторы могут быть как MOSFET, так и IGBT. Можно поставить обычные биполярные транзисторы. Всё зависит от мощности двигателя. При увеличении мощности разработчики стараются повысить напряжение питания АИН. Что касается частоты коммутации ключей, то обычно она не превышает 20 кГц. Поэтому если на входе 24 В, то можно поставить MOSFET или биполярные ключи. Сегодня предпочтение отдают MOSFET, так как у них больший запас по частоте, а значит они меньше греются и габариты радиатора будут меньше.

Таким образом, BLDC управляется в режиме автокоммутации фаз с поддержанием фазного тока на заданном уровне. Рисунок 13 поясняет, что такое противоЭДС.

Теперь обратимся к методу управления ВЛАС. Это самый известный метод управления синхронным двигателем. Обычно его называют векторным, или векторной ШИМ, хотя эти названия не отражают сути. Принцип его заключается в следующем. Двигатель представляется в виде обобщённой электрической машины. Есть оси статора и ротора. Двухфазная система координат статора неподвижная, а система координат ротора подвижная. Вся математика системы построена таким образом, чтобы вращающий момент двигателя был максимальным. Векторным этот способ называют потому, что все токи, напряжения и потокосцепления рассчитываются по методам векторной математики (см. рис. 14). Вектор-



**Рис. 13.** Схема замещения статора BLDC при подаче питания на фазы А и В

ная же ШИМ разработана именно под этот метод. Отсюда и название. В данном случае используется датчик положения ротора. Это может быть, например, резольвер. Применение датчика позволяет расширить диапазон регулирования скорости и повысить точность, по сравнению с бездатчиковым алгоритмом. Но это увеличивает стоимость. Как видите, везде есть свои плюсы и минусы.

### СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

На сегодняшний день электроприводы, выпускаемые промышленностью, в основном цифровые. Это значит, что ядром системы управления приводом может являться микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор (DSP). Современный электропривод представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя), силового преобразователя и устройства управления. Двигатель может быть асинхронным (AC motor), синхронным с постоянными магнитами (PMSM), обычным ДПТ (BDC) или бесколлекторным двигателем постоянного тока (BLDC). Силовой преобразователь, как правило, имеет топологию 6-транзисторного АИН, если речь идёт не о ДПТ и не о SRM (вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением), а также не о больших мощностях.

Микроконтроллер вопросов не вызывает. Например, 8-разрядный ATMEGA 16 легко обеспечивает быстрдействие

и точность на необходимом уровне (простое вращение вала). Он отлично подходит для управления мало-мощным ДПТ без скоростных интерфейсов связи. В промышленности же, в основном, применяются сигнальные процессоры.

### ЦИФРОВОЙ СИГНАЛЬНЫЙ ПРОЦЕССОР

Digital signal processor (DSP) – специальный микроконтроллер, предназначенный для цифровой обработки сигналов, в масштабе реального времени. Какие параметры DSP влияют на качество регулирования? Это разрядность, быстрдействие, разрядность и быстрдействие модуля АЦП. На сегодняшний день наиболее широкое применение нашли DSP фирмы Texas Instruments. Texas Instruments выпускает DSP семейства Motor control – TMS320C28x. Это 32-разрядные DSP с фиксированной запятой (fixed-point). Сигнальные процессоры C28x по сути представляют собой высокопроизводительный микроконтроллер с 32-разрядной шиной данных. Семейство C28x содержит периферию для приложений управления (например, CAN-интерфейс, модуль ШИМ и модули АЦП). Процессоры C28x применяются для управления приводами и цифровыми импульсными источниками питания. Тактовая частота DSP C28x достигает 150 МГц.

Преимущества TMS320C28x:

- разрядность 32 бита и возможность работы с псевдоплавающей запятой (Float-Point) посредством библиотеки IQmath – высокая точность регулирования;
  - сильная периферия (12-битный АЦП, CAN, UART, модуль PWM);
  - быстрдействие до 150 МГц.
- Недостатки TMS320C28x:
- последовательно выполняемая программа управления вращением двигателя и АЦП конечного быстрдействия. Это накладывает временные ограничения на структуру системы управления;
  - управление на базе DSP производится по принципу единичного прерывания, а это значит, что частота прерывания, в котором идёт расчёт вращения, зависит от быстрдействия АЦП и также накладывает временные ограничения на обработку интерфейсного прерывания.

Существуют и отечественные аналоги микроконтроллеров Texas Instru-

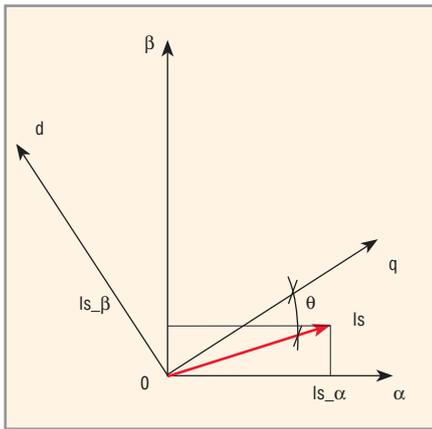


Рис. 14. Вектор тока статора в неподвижной и вращающейся системах координат

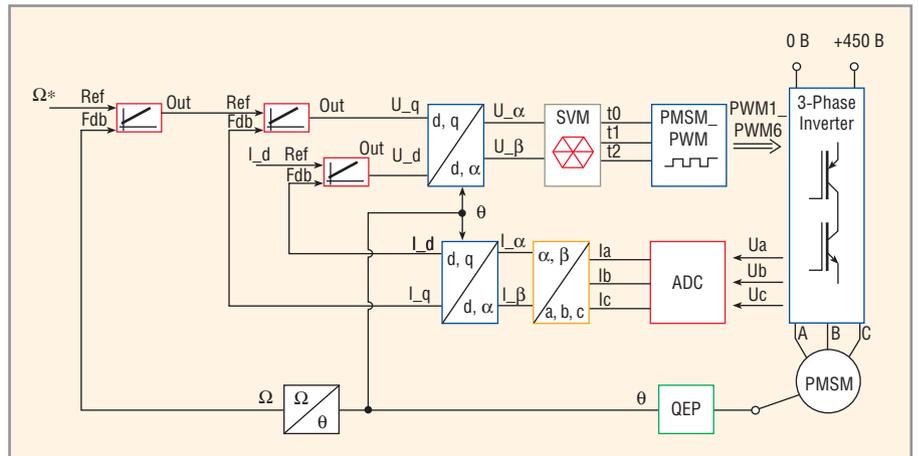


Рис. 15. Обобщенная структурная схема системы управления электроприводом PMSM

ments. Например, фирма «Миландр» выпускает свои микроконтроллеры на базе ядер ARM Cortex-M3 и M4. Вопрос специфики применения отечественных микроконтроллеров в приводах на базе BLDC или PMSM довольно обширный и заслуживает отдельной статьи.

На рисунке 15 представлена структурная схема управления электроприводом PMSM. Микроконтроллер управляет скважностью силовых ключей

и снимает сигналы с АЦП. Вращение вычисляется в программных модулях. Тут есть и цифровые ПИД-регуляторы, и модули координатных преобразований, и векторная ШИМ, и многое другое. Учитывая полосу пропускания электропривода, тактовой частоты DSP вполне хватает как на вращение, так и на обмен информацией по интерфейсам. Устройство электроприводов BLDC или PMSM с системой управления от DSP Texas

Instruments или микроконтроллера фирмы «Миландр» – довольно обширный вопрос и выходит за рамки данной статьи.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. СПб. БХВ-Петербург. 2002. 464 с. Ил.
2. TMS320F2810, TMS320C2810 Digital Signal Processors – Texas Instruments. 2012. ©

**Внедрение САПР - дело непростое.**  
Хотите купить не просто диск, а сразу получить систему, готовую к эффективному использованию?

# Altium Designer

от НПП «Родник»:  
**все включено!**

- Altium Designer
- Комплект библиотек
- Техническая поддержка
  - Обучение
  - Внедрение на предприятии

Тел.: +7 (499) 613-7001, [www.rodnik.ru](http://www.rodnik.ru)

Реклама