

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

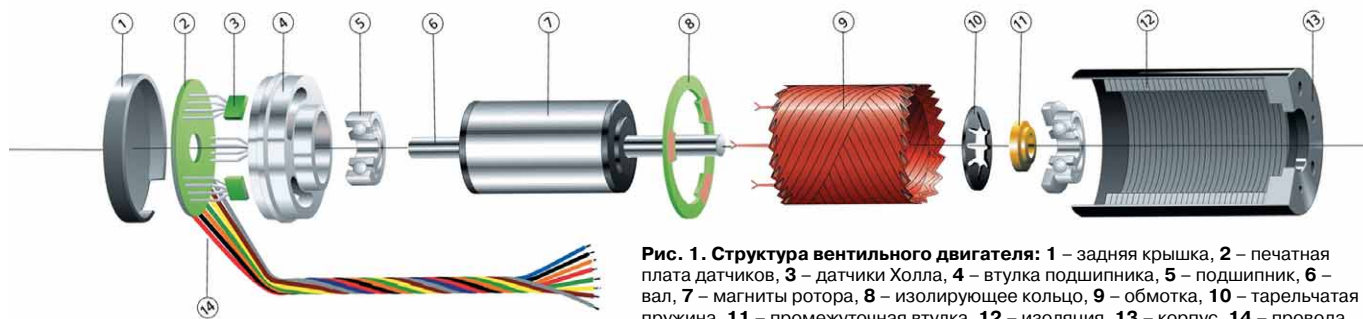


Рис. 1. Структура вентильного двигателя: 1 – задняя крышка, 2 – печатная плата датчиков, 3 – датчики Холла, 4 – втулка подшипника, 5 – подшипник, 6 – вал, 7 – магниты ротора, 8 – изолирующее кольцо, 9 – обмотка, 10 – тарельчатая пружина, 11 – промежуточная втулка, 12 – изоляция, 13 – корпус, 14 – провода.

The principle of operation and main components of modern AC brushless motor are considered. Main commutation methods based on rotor position sensor are described. Key features of integrated version are reviewed.

Для решения задач контролируемого движения в современных прецизионных системах все чаще применяются вентильные (бесколлекторные) двигатели. Такая тенденция обусловлена преимуществами вентильных двигателей и бурным развитием вычислительных возможностей микроэлектроники. Как известно, вентильные (синхронные) двигатели обеспечивают наиболее высокие плотность длительного момента (момент в единице объема) и энергетическую эффективность по сравнению с любым другим типом двигателя.

Современный вентильный привод объединяет электрическую, механическую и электронную подсистемы в единое цельное мехатронное устройство. В рамках такого подхода удастся значительно сократить габариты, избавиться от лишних преобразователей и промежуточных элементов, а значит повысить надежность всего привода в целом.

В рамках данной статьи рассматривается принцип работы и устройство современных вентильных машин, описываются принципы управления вентильного преобразователя для коммутации с применением датчиков положения ротора, а также рассмотрены особенности интегрированного исполнения вентильных двигателей.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Под **вентильным двигателем** понимают синхронный двигатель, содержащий многофазную обмотку статора, ротор с постоянными магнитами и встроенным датчиком положения. Коммутация такого двигателя осуществляется при помощи **вентильного преобразователя**. Поэтому его принято называть «**вентильным**».

По сути, вентильный двигатель с точки зрения метода коммутации представляет собой «инвертированный» вариант коллекторной машины постоянного тока. В вентильном двигателе индуктор находится на роторе, якорная обмотка – на статоре. Коммутация осуществляется путем подачи управляющего согласованного воздействия на обмотки статора в зависимости от положения ротора, определяемого с помощью интегрированных в двигатель датчиков обратной связи.

Рассмотрим структуру вентильного двигателя на примере семейства двигателей Faulhaber (**рис. 1**). В данном случае в основе ротора лежит двухполюсный магнит, статора – трехфазная обмотка, положение ротора определяется с помощью интегрированных в двигатель датчиков Холла. В общем случае ротор может содержать другое количество пар полюсов, а статор иметь более традиционную конструкцию, внешне сходную со статором асинхронной машины.

Наиболее распространен статор с тремя обмотками, соединенными «звездой» (реже в «треугольник») без вывода средней точки. Как известно, именно трехфазная структура является наиболее эффективной при минимуме числа обмоток.

При **соединении обмоток «звездой»** вентильные двигатели имеют большие постоянные моменты и меньшие постоянные противо-ЭДС (при соотношении $\sqrt{3}$ по сравнению с соединением «треугольником»). Поэтому соединение «звездой» используется для управления осями, требующими больших моментов, а соединение «треугольником» – для больших скоростей.

В большинстве случаев обмотки статора выполняются без насыщения, т.е. противо-ЭДС обмоток имеет синусоидальную форму. Такие двигатели зачастую называют AC brushless motor в отличие от DC brushless motor, обмотки статора которого выполняются с насыщением. Такое насыщение в DC brushless motor предназначено для снижения пульсаций тока (и соответственно момента) при применении трапецеидальной коммутации.

Но иногда термин DC brushless motor используют для brushless motor с питанием через инвертор от сети постоянно тока, что не совсем корректно.

Обычно количество пар полюсов, определяемое количеством пар магнитов ротора и определяющее соотношение механического и электрического оборотов, равно 4...8.

Статор может быть выполнен с **железным** (iron core) или **безжелезным** (ironless) сердечником. Конструкция статора с безжелезным сердечником обеспечивает отсутствие силы притяжения магнитов ротора и железа статорной обмотки (magnetic attraction) и зубцового эффекта (cogging), но снижает незначительно (на 10...20%) эффективность двигателя из-за меньших значений постоянной момента.

Одно из самых очевидных преимуществ ротора с постоянными магнитами состоит в **уменьшении диаметра ротора** и, как следствие, в **уменьшении момента инерции ротора**. Технологически магниты могут быть встроены в ротор или расположены на его поверхности. Но пониженный момент инерции зачастую приводит к малым значениям отношения момента инерции двигателя и приведенного к его валу момента инерции нагрузки (mismatch ratio), усложняющему настройку привода. Поэтому ряд производителей предлагает наряду со стандартным и повышенный – в 2...4 раза момент инерции ротора.

2. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

В качестве датчика положения, необходимого для коммутации вентильного двигателя, могут быть использованы датчики Холла (цифровые или аналоговые), энкодер (цифровые, аналоговые или абсолютные) или резольвер.

Цифровые датчики Холла используются для наиболее распространенной – трапецеидальной коммутации вентильного двигателя. Цифровые датчики Холла могут быть выполнены также и на оптической шкале энкодера.

Аналоговые датчики Холла используются для синусоидальной коммутации вентильного двигателя.

Энкодер имеет три дифференциальных канала – два канала А, В прямоугольных импульсов, сдвинутых на 90 электрических градусов и нулевой импульс I (индекс).

Резольвер представляет собой вращающийся трансформатор с обмоткой возбуждения и двумя выходными обмотками со сдвигом 90° электрических градусов.

Аналоговый энкодер имеет аналоговые sin/cos (1В между пиками peak-to-peak) дифференциальные выходы. Внешний интерполятор позволяет повысить исходное разрешение с коэффициентом умножения до 4096.

Абсолютный энкодер передает информацию по положению по синхронному последовательному интерфейсу (SSI или BiSS), протокол которого задается производителем энкодера. Одними из наиболее популярных протоколов являются Heidenhain EnDat, Tamagawa Smart Abs и Stegman Hiperface протоколы.

Кроме датчика положения дополнительно могут быть встроены: тахогенератор, термодатчик, тормоз или редуктор.

Тахогенератор применяется в случае использования вентильного двигателя в режиме регулирования/стабилизации скорости с высокой точностью.

Термодатчик для защиты обмоток от перегрева представляет собой несколько последовательно соединенных позисторов, т.е. терморезисторов с положительным температурным коэффициентом (positive temperature coefficient PTC).

3. СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ

С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА

Способы коммутации вентильного двигателя различаются по типу датчика положения ротора и особенностям регулирования тока в фазах обмоток статора.

3.1. Трапецеидальная или шестишаговая (six-step) коммутация вентильного двигателя осуществляется по цифровым датчикам Холла. Для 3-х датчиков Холла, являющихся «грубым» датчиком положения ротора, возможных состояний на полный электрический оборот будет шесть, каждое из которых соответствует 60 электрическим градусам. При каждом постоянном состоянии датчиков Холла подключаются только две обмотки двигателя, а третья отключена от источника напряжения. Постоянство вектора тока в пределах ±30 электрических градусов от оптимального (создающего максимальный момент) приводит к 17% пульсациям тока.

Преимущества: готовность к работе при включении питания; дешевый усилитель тока; управление током (моментом/силой) аналоговым сигналом ±10В.

Недостатки: пульсации тока; средние показатели быстродействия при позиционировании и равномерности при сканировании.

Область применения: регулирование скорости при невысоких требованиях к эффективности и равномерности перемещения на низких скоростях.

3.2. Синусоидальная коммутация лишена недостатков трапецеидальной коммутации за счет непрерывной и плавной коммутации вектора тока. Это достигается благодаря более высокому разрешению датчика положения ротора (обычно инкрементального энкодера) по сравнению с цифровыми датчиками Холла, имеющих разрешение только 60 электрических градусов. Для стандартного двигателя с соединением фаз в «звезду» достаточно контролировать ток в двух обмотках с помощью двух регуляторов на базе ПИ-регуляторов. Такой способ коммутации очень эффективен на малых и средних скоростях, но имеет ошибки на высоких скоростях. В этом случае из-за ограниченного усиления ПИ-регулятора при заданном напряжении постоянного напряжения (DC bus) max скорость ограничена. Несколько повысить скорость позволяя метод сдвиг фазы (phase advance).

Преимущества: минимальные пульсации тока; высокие показатели быстродействия при позиционировании и равномерности при сканировании.



- Коллекторные микродвигатели
- Бесколлекторные микродвигатели
- Шаговые микродвигатели
- Линейные микродвигатели
- Управляющая электроника
- Энкодеры
- Сервокомпоненты
- Прецизионные редукторы



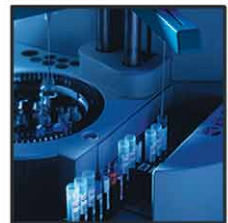
- Линейные серводвигатели
- Модули линейного движения
- Управляющая электроника
- Специальные контроллеры
- Аналоговые сервоусилители
- CAN-платы и устройства



- Коллекторные двигатели
- Бесколлекторные двигатели
- Специальные двигатели
- Интегрированный сервопривод
- Прецизионные редукторы
- Сервокомпоненты
- Управляющая электроника



- Коллекторные двигатели
- Червячные мотор-редукторы



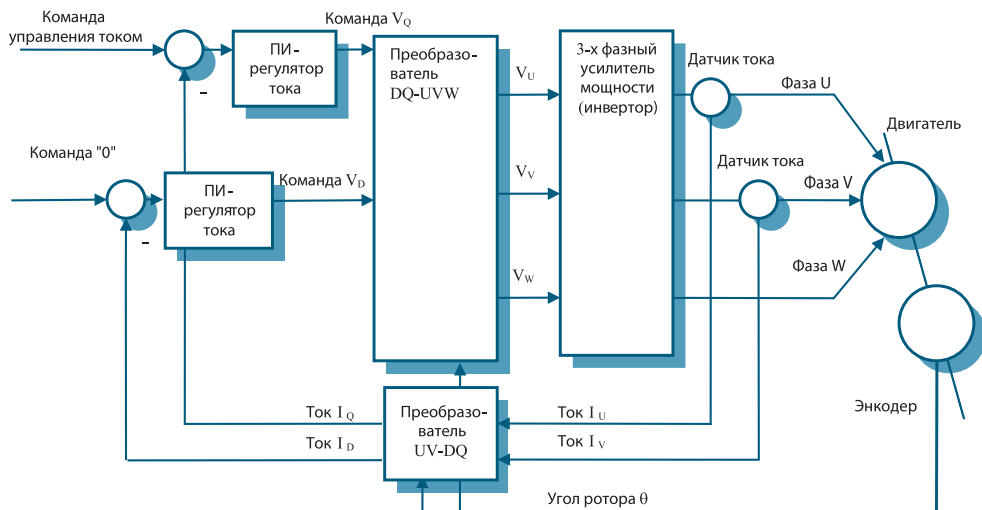


Рис. 2 Векторный контроль тока вентильного двигателя

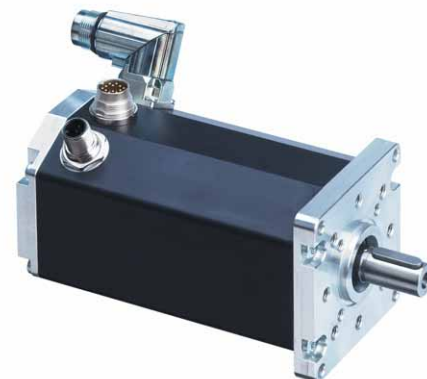


Рис. 3 Двигатели Dunkermotoren серии BG

Недостатки: ограничение max скорости при заданном напряжении постоянного напряжения; управление током (моментом/силой) при помощи двух аналоговых сигналов $\pm 10V$.

Область применения: прецизионные механизмы.

3.3. Непосредственно векторный контроль тока в координатах D-Q использует преобразования между статическими DQ и вращающимися UUV координатами вектора тока известными как преобразования Парка-Кларка. В отличие от синусоидальной такой способ коммутации предполагает работу ПИ-регулятора с напряжениями постоянного тока, а не синусоидальными напряжениями. Это и обеспечивает качество управления током, независимое от скорости вращения двигателя.

Векторный контроль предполагает регулирование квадратичной (D) и прямой (Q) составляющих тока. Т.к. только прямая (Q) составляющая тока, перпендикулярная к полю ротора, создает момент двигателя, то задание тока подается на вход прямой (Q) составляющая тока. На вход квадратичной (D) составляющей тока подается «0» сигнал.

Преобразования между статическими DQ и вращающимися UUV координатами вектора тока производятся с учетом токов фаз и положения ротора.

Векторный контроль при наличии преимуществ синусоидальной коммутации позволяет расширить диапазон скоростей вентильного двигателя за счет более полного использования напряжения постоянного тока,

Следует отметить, что для синусоидальной или векторной коммутации тока при использовании инкрементального (относительного) датчика положения ротора, необходимо первоначально (т.е. при каждом включении питания) сфазировать положение ротора относительно фаз статора. Алгоритм такой начальной фазировки обычно является «встроенным».

Трапецидальная коммутация вентильного двигателя не требует начальной фазировки благодаря использованию датчиков Холла, являющихся абсолютным датчика положения ротора. Поэтому их иногда применяют вместе с инкрементальным датчиком положения для реализации синусоидальной или векторной коммутации тока без необходимости производить начальную фазировку. Такая конфигурация рекомендуется для механизмов, где реализация процедуры начальной фазировки затруднена, например, механизмов вертикального перемещения.

4. ИНТЕГРИРОВАННОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Одной из основных перспективных тенденций в развитии современных вентильных двигателей является тяготение производителя к интеграции в единый корпус с двигателем

управляющей электроники. Такое решение позволяет предлагать не разрозненный набор комплектующих приводной системы, а законченный привод в сборе. Таким образом решаются возможные проблемы совместимости различных компонент привода, а также проблема различных интерфейсов компонент приводной системы.

Примером интегрированного привода является вся серия двигателей BG, предлагаемая компанией Dunkermotoren (рис. 3).

В рамках данной серии двигателей производитель предоставляет возможность заказать одну и ту же модель в различных исполнениях:

- без интегрированной управляющей электроники,
- с интегрированной коммутирующей электроникой (2-wire),
- с интегрированным контроллером скорости,
- с интегрированным контроллером движения,
- с интегрированным контроллером движения с сетевыми интерфейсами (CAN, PROFINET).

5. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При разработке нового изделия разработчик часто сталкивается с проблемой выбора двигателя для решения конкретной задачи движения. Когда речь идет о построении привода средней либо малой мощности, как правило, выбор сводится к сборкам на базе коллекторных, вентильных, а также шаговых двигателей.

К несомненным достоинствам вентильных двигателей следует отнести:

Высокий запасаемый момент:

- Идеальное решение при высоких пиковых нагрузках
- Хорошее ускорение при изменяющихся нагрузках

Высокий диапазон скоростей

Высокая точность позиционирования благодаря возможности использования энкодеров и других датчиков обратной связи по скорости/положению.

Двигатели для специальных применений:

- в среде высокого вакуума,
- автоклавируемые
- погружные с высоким классом IP защиты.

М. Сонных, Л. Ганнель
ООО «Микропривод»
sonnykh@microprivod.ru