

## **ВЕНТИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ**

**Одним из проявлений общемировой тенденции развития производства высокотехнологичной электротехнической продукции являются определенные успехи в области создания нового поколения регулируемых электроприводов с использованием вентильных электродвигателей.**

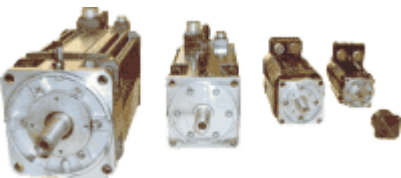
Выпуск таких электроприводов осваивают в настоящее время практически все ведущие электротехнические компании. Предложение на рынке вентильных электродвигателей характеризуется широким мощностным диапазоном - от единиц ватт до сотен киловатт, которые могут использоваться в самых различных отраслях промышленности, в том числе и аэрокосмической.

### **О достоинствах и недостатках**

Специалисты считают, что вентильные двигатели с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B в настоящее время остаются наиболее перспективными из всех типов электродвигателей, применяемых в современных регулируемых электроприводах малой и средней мощности. Это объясняется целым рядом конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ двигателя по сравнению с существующими типами электрических машин, к числу которых можно отнести:

- бесконтактность и отсутствие узлов, требующих обслуживания. Отсутствие у вентильных электродвигателей скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими двигателями постоянного тока или асинхронными двигателями с явно выраженной обмоткой на роторе;
- большая перегрузочная способность по моменту (кратковременно кратность максимального момента равна 5 и более);
- высокое быстродействие;
- наивысшие энергетические показатели (кпд и  $\cos$ ). Показатели кпд вентильных двигателей превышают 90% и очень мало меняются при изменении нагрузки двигателя по мощности и при колебаниях напряжения питающей сети, в то время как у асинхронных электродвигателей максимальный кпд составляет не более 86% и зависит от изменений нагрузки;
- минимальное значение токов холостого хода и рабочих токов, что позволяет достаточно точно измерять нагрузку на привод и оптимизировать режим работы;
- имеют практически неограниченный диапазон регулирования частоты вращения (1:10000 и более) и возможность регулирования частоты вращения по различным законам;
- у вентильных двигателей более простая схема преобразователя по сравнению с асинхронным частотно регулируемым электроприводом;
- низкий перегрев вентильного электродвигателя увеличивает срок службы электропривода, поскольку увеличивается ресурс изоляционных материалов, работающих при более низких температурах. Этот же фактор позволяет электроприводу работать в нестандартных режимах с возможными перегрузками;
- минимальные массогабаритные показатели при прочих равных условиях;
- значительный срок службы (наработка на отказ составляет 10000 ч и более), надежность. Ресурс электродвигателя и всего агрегата увеличивается также за счет возможности оптимизации режимов работы по скорости и нагрузке.

Однако у вентильных двигателей есть и недостатки. До недавнего времени одним из основных недостатков, препятствующих широкому распространению вентильных электроприводов в оборудовании, где электродвигатель и станция управления им находятся на значительном расстоянии (например, в нефтедобыче) или в оборудовании, которое подвергается значительным механическим воздействиям вибрационного и ударного характера, считалась необходимость введения дополнительных слаботочных каналов управления подключением тех фаз электродвигателя, которые создают максимальный момент с полюсами ротора, т. е. другими словами, необходимость наличия специального датчика положения ротора. Но эта проблема вполне решается. Российскими



специалистами запатентован способ управления вентильными электроприводами мощностью до 160 кВт без датчика положения ротора

### Преодоление разрыва

**З**а последние десять лет вентильные электродвигатели заняли прочное положение в производственных программах ведущих зарубежных электромашиностроительных компаний ("Сименс", "Бош Рексрот", "Дженерал Электрик", "Ансальдо", "Фанук" и др.). В большинстве каталогов готовой продукции этих компаний вентильные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами представлены на первом месте.

**З**атянувшийся промышленный кризис в России и странах СНГ привел к значительному отставанию отечественного электромашиностроения в данной области, хотя определенные успехи все-таки были. Например, в 80-х годах прошлого столетия была разработана и освоена в опытном производстве отечественная серия вентильных двигателей (2ДВМ) в двух габаритах по диаметру присоединительных размеров фланцев: 115 и 85 мм. При этом двигатели большего габарита представляли собой бескорпусные машины, продольная жесткость которых обеспечивалась сварными швами по внешней поверхности и стяжными шпильками в углах листов статора. Как показал опыт эксплуатации этих ВД, жесткость такой конструкции недостаточная, особенно для двигателей с длиной пакета 140 мм. Двигатели меньшего габарита были лишены этого недостатка, так как имели литой алюминиевый корпус. Однако те и другие двигатели оснащались магнитоэлектрическими тормозами, располагавшимися в переднем щите электродвигателя, что приводило к некоторому увеличению осевой длины машины и ее массы.

**Т**ем не менее жесткие условия рыночной экономики, диктующие стремление производить конкурентоспособную продукцию, обеспечивающую относительно более стабильное положение на рынке, заставляют отдельные электротехнические предприятия изыскивать средства для разработки и освоения производства вентильных двигателей. Так, содружеством электротехнических предприятий, среди которых главным выступает Чебоксарский электроаппаратный завод (ОАО "ЧЭАЗ") спроектированы современные отечественные вентильные двигатели (серии **5ДВМ**), в которых учтены недостатки двигателей предыдущего поколения. Все габариты двигателей этой серии имеют корпусное исполнение, что позволяет значительно повысить их продольную жесткость. Кроме того, для этих двигателей применяются новые малогабаритные тормоза, расположенные на валу в пространстве под лобовыми частями обмоток статора. Принятые новые конструктивные решения позволяют сократить габаритную длину двигателей в основных исполнениях до 5% и снизить массу до 20%, а также получить экономию электротехнической стали и унифицировать передние щиты для всех типоразмеров двигателей.

**В** двигателях новой серии применены более термостабильные отечественные постоянные магниты из материала "железо-неодим-бор" со специальными легирующими добавками, которые способствуют повышению коэрцитивной силы и сохранению работоспособности магнитов при нагреве до +170 °С и пятикратном от номинального кратковременном значении момента и тока якоря. Последнее обстоятельство также способствует снижению расхода дорогостоящих магнитных материалов (уменьшение толщины магнитов в 1,5 раза) и улучшению массогабаритных показателей.

**В**се типоразмеры двигателей 5ДВМ имеют класс изоляции Р, снабжены датчиками температурной защиты (терморезисторы в лобовых частях обмотки), имеют встроенные бесконтактные тахогенераторы и фотоэлектрические датчики положения ротора за исключением двигателя 5ДВМ55, в котором отсутствует исполнение с тормозом, нет тахогенератора, а датчик положения ротора выполнен на магнито-чувствительных микросхемах, расположенных в заднем щите электродвигателя. Показатель надежности - средняя наработка на отказ - 1000 часов. Средний уровень шума в режиме холостого хода не превышает 82 дБ для двигателей 5ДВМ115 и 72 дБ - для меньших габаритов.

**В** таблицах 1 и 2 представлены некоторые технические параметры отечественных вентильных двигателей и лучших образцов зарубежных аппаратов. По мнению целого ряда специалистов, с которыми нам доводилось беседовать, продукция отечественной электротехнической промышленности в этом сегменте по ряду показателей оказывается вполне конкурентоспособной.

**Таблица 1**  
**Основные характеристики вентильных двигателей 5ДВМ**

Тип двигателей	Длительный момент в стопорном режиме, Нм	Длина, мм	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса, кг
ДВМ55	0,05; 1,0	61	420; 1800	0,4
5ДВМ55	0,23; 0,47; 0,7; 1,3	218	2000; 3000; 4000; 6000	4,5
5ДВМ115	2,3; 3,5; 4,7; 7	342	2000; 3000; 4000; 6000	13,1
5ДВМ165	10; 13; 17; 23	536	1000; 2000; 3000; 4000	67
5ДВМ215	23; 35; 47; 70	637	1000; 2000; 3000; 4000	28

**Таблица 2**  
**Основные характеристики вентильных двигателей 1FT6 компании Siemens**

Тип двигателей	Длительный момент M <sub>до</sub> , Нм	Длина, мм	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса, кг
1FT6 75	1,0; 2,0	260	до 6000	4,4
1FT6 100	2,5; 5,0	280	до 6000	8,3
1FT6 130	4,0; 6,0; 9,5	305	до 6000	12,5
1FT6 165	8; 13; 20; 27	345	до 4500	25,5
1FT6 215	27; 50; 70	470	до 3000	55,5

### Последствия промышленного освоения

**П**ромышленное освоение вентильных электродвигателей открыло возможности для создания различных типов электродвигателей широкого применения и разработки новых сопутствующих изделий, таких как магнитоэлектрические быстродействующие тормоза с использованием высокоэнергетических постоянных магнитов. Эти устройства, между прочим, находят все более широкое применение не только в изделиях электромеханики, но и в электронике, приборостроении и во многих других областях техники. Кроме того, разрабатывается новое технологическое оборудование для намагничивания и контроля высокоэнергетических постоянных магнитов.

### К вопросу об эффективности

**Д**ля сравнительного анализа различных типов двигателей отечественные специалисты используют показатель электромеханической эффективности, представляющий собой отношение номинального момента к массе двигателя.

**Д**ля выведения формулы этого показателя используется классическое представление электромагнитного момента (М) через касательную удельную силу, приложенную к единице поверхности ротора. Массу машины приближенно оценивают через ее основные параметры. Полученное в результате математических преобразований соотношение характеризует электромеханическую эффективность электрической машины и выражается отношением удельной касательной силы к коэффициенту пропорциональности, который в свою очередь зависит от типа материалов, конструктивного исполнения машины и ее габаритов.

**И**з этого соотношения следует, что электромеханическая эффективность машины растет с увеличением ее мощности и габаритов, так как для более крупных машин допустимы более высокие удельные нагрузки. Кроме того, при одинаковых габаритах и конструктивном исполнении различных электрических машин электромеханическая эффективность будет больше у той машины, которая допускает более высокую линейную нагрузку и более высокую магнитную индукцию, непосредственно связанные со значением электрических и магнитных потерь в машине. Известно, что основные электрические и магнитные потери в роторе вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов отсутствуют. Помимо этого, современные редкоземельные постоянные магниты на основе соединения "железо-неодим-бор" способны обеспечить максимальную индукцию в воздушном зазоре даже без концентрации потока на уровне асинхронных машин, т. е. порядка 0,6-0,8 Тл. Таким образом,

при условии сохранения суммарных потерь в машине на одном уровне в вентильном двигателе может быть повышена линейная нагрузка, что и объясняет более высокую электромеханическую эффективность вентильных двигателей по сравнению с другими типами бесконтактных электродвигателей переменного тока. Этому способствует также и то обстоятельство, что БД работает, как правило, с коэффициентом мощности близким к единице, благодаря соответствующей настройке датчика положения ротора.

### **Что это такое?**

**В**ентильные электродвигатели 5ДВМ представляют собой полностью бесконтактные электрические машины фланцевого исполнения с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов Nd-Fe-B, расположенных на роторе. Двигатели оснащены комплексным бесконтактным датчиком, включающим в себя тахогенератор ТС-45 и фотоэлектрический датчик положения ротора. Имеются исполнения с возможностью пристройки к валу на заднем щите датчика перемещений типа BE178. В переднем щите предусмотрено расположение безынерционного магнитоэлектрического тормоза аварийной остановки двигателя. В лобовых частях обмоток статора заложены датчики температурной защиты. Двигатели серии 5ДВМ выпускаются в четырех габаритах по диаметру присоединительных отверстий переднего фланца: 55, 85, 115, 215. В каждом габарите имеется несколько исполнений по длине, что позволило охватить диапазон номинальных моментов от 0,05 до 70 Н\*м. Конструкция двигателей обеспечивает любое рабочее положение в пространстве. Двигатели могут работать от импортных электроприводов аналогичного назначения.

**Н**о не только высокоэнергетические постоянные магниты вышли за рамки производства электротехнических изделий. Например, магнитоэлектрические тормоза типа МЭТ, разработанные и освоённые для комплектации вентильных электродвигателей 5ДВМ, также применяются в других двигателях и устройствах. В тормозных устройствах этого типа тормозное усилие создается между трущимися поверхностями дискового якоря и кольцевого магнитопротода за счет усилия, создаваемого полем постоянных магнитов из материала Nd-Fe-B. Растормаживание осуществляется подачей постоянного напряжения 24 В (+10-15%) на катушку, создающую встречное магнитное поле. Тормоза рассчитаны на максимальную частоту вращения до 10000 об/мин, выдерживают до 60000 оборотов в замкнутом состоянии и сохраняют работоспособность при двойном увеличении зазора за счет износа трущихся поверхностей.

**С**овершенствование технологии изготовления постоянных магнитов, ведущее к значительному возрастанию магнитных свойств магнитотвердых материалов, требует применения современных импульсных методов и средств намагничивания, отличающихся от намагничивания постоянных магнитов в стационарных полях электромагнитов.

**П**ерспективным направлением в решении этой возникшей проблемы явилась разработка электрофизической аппаратуры - мощных намагничивающих устройств, а также разработка индукторных систем - устройств синтеза различных распределений магнитного поля в пространстве, необходимых при намагничивании. Такое оборудование характеризуется быстройдействием, малым потреблением энергии, позволяет осуществлять намагничивание современных магнитных систем с различными марками постоянных магнитов, включая высококоэрцитивные магниты из неодима. Главное преимущество намагничивающего оборудования в том, что оно способно создавать достаточно сильные магнитные поля при сравнительно малой, потребляемой из сети, мощности. Импульсное технологическое оборудование для намагничивания высокоэнергетических постоянных магнитов и изделий на их основе разработано и изготавливается на отечественных предприятиях для обеспечения производства вентильных электродвигателей. Это технологическое оборудование позволяет решить важнейшую технологическую задачу, как по входному контролю постоянных магнитов, так и по намагничиванию в составе роботов в сборе.

**В**от яркий пример влияния производства и внедрения вентильных двигателей на развитие производства в других отраслях промышленности. Ужесточение требований европейских стандартов к уровню шума и радиочастотных помех потребовало приведения в соответствие этим требованиям качества комплектующих для автотракторной техники со стороны заводов-изготовителей. Коллекторные машины на практике не могут быть существенно улучшены, следовательно, вопрос об их замене на вентильные двигатели становится актуальным. Новые вентильные электродвигатели типа ДВФ разработаны для замены существующих коллекторных постоянного тока с сохранением

габаритных и присоединительных размеров. Они имеют значительно больший ресурс и более высокие энергетические показатели, меньшее потребление электроэнергии, меньший уровень шума и электромагнитных помех.

**Е**ще один пример. В содружестве с Чувашским государственным университетом и ЗАО "ЭЛКАР" на ОАО "ЧЭАЗ" разработан тяговый вентильный электродвигатель **ВМЭД-01** мощностью 120 кВт для использования в электроприводах специальных транспортных средств (городской автотранспорт, электромобиль) и автомобилей. Благодаря применению высококоэрцитивных постоянных магнитов Nd-Fe-B, принудительному охлаждению и использованию конструктивных специальных решений в активных частях магнитной системы этот двигатель имеет рекордные удельные массогабаритные показатели, значительно превосходящие показатели других известных типов двигателей.

**У**спехи в области силовой и микропроцессорной техники создали благоприятные условия для разработки и производства электроприводов нового поколения на базе вентильных электродвигателей. В развитых странах наблюдается широкое внедрение высокотехнологичной электротехнической продукции. В настоящее время у наших предприятий, которые в условиях новой экономики вынуждены осваивать современную наукоемкую продукцию, есть возможность не только утвердиться на отечественном рынке, но и попробовать выйти на мировой.