

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 62-83:621.31

А.Ю. Смирнов

### ВОПРОСЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО СИНХРОННОГО ПРИВОДА

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Рассматривается классификация электрических машин для бесконтактного синхронного привода, детализированная с учётом возможности создания одной обмоткой машины двух полей одновременно. Приведены конкретные конструкции, поясняющие отдельные пункты классификации, ссылками на результаты экспериментальных и расчётных исследований показана важность правильного определения типа бесконтактной синхронной машины.

*Ключевые слова:* бесконтактный синхронный привод, классификация электрических машин, реактивная машина, индукторная машина.

Теория и практика применения электрических машин в бесконтактном синхронном приводе настоятельно диктуют требование правильной их классификации.

Однако в отечественной научно-технической литературе, в том числе в публикациях последних лет, многие авторы весьма вольно употребляют термины, относящиеся к названиям бесконтактных синхронных машин, не учитывая, что за каждым из них стоит определённый физический смысл. В отечественной технической литературе нередко применяют такие малоинформативные названия, как “параметрическая” машина, “редукторный” двигатель. Можно встретить и вовсе неправильное “электромагнитный” двигатель. Термин “шаговый двигатель” применяется без учёта того, что это определение относится к электродвигателю с преобразователем, т.е. к электроприводу, а не к самой машине. В качестве шагового двигателя может быть использована не только любая синхронная машина, но даже и асинхронная. Достаточно подключить только эти устройства к источнику импульсного напряжения, без обратной связи по положению ротора.

К вопросам классификации бесконтактных синхронных машин настоятельно возвращались в своих трудах такие заслуженные теоретики и практики в области электропривода, как проф. Борис Алексеевич Ивоботенко и проф. Михаил Григорьевич Чиликин [1].

Наиболее полно возможные модификации принципиальных исполнений электрических машин переменного тока, в том числе бесконтактных синхронных, рассмотрены в фундаментальном труде по электрическим машинам проф. А.В.Иванова-Смоленского [2]. Кроме деления на реактивные и индукторные, в зависимости от того, одну или две обмотки содержит машина, классификация учитывает зубчатость магнитопроводов статора и ротора – зубчатый или гладкий каждый из них, и полюсность каждой из обмоток – одноимённо-полюсная или переменного-полюсная.

В настоящей статье приводится классификация на основе [1] и [2], детализированная с учётом того, что в зависимости от режима питания единственная обмотка однообмоточной машины может выполнять функции сразу двух обмоток: и обмотки якоря, и обмотки возбуждения.

В зависимости от наличия индуктора, признаков его конструкции и особенностей соз-

даваемого им потока возбуждения все бесконтактные синхронные машины можно отнести к одной из четырёх категорий:

- с постоянными магнитами на роторе (магнитоэлектрические);
- реактивные;
- индукторные;
- индукторно-реактивные.

К первой категории относятся машины, индуктор которых выполнен с включением в магнитную цепь ротора участков из магнитотвёрдого материала - постоянных магнитов. Они образуют по окружности ротора полюса чередующейся полярности так же, как и в машине с электромагнитным возбуждением со стороны ротора. Всего таких конструкций три:

- с радиально намагничёнными магнитами литого или составного звездообразного индуктора, образованного призматическими магнитами (рис. 1, а);
- коллекторного типа, с тангенциально намагничёнными магнитами (рис. 1, б);
- с когтеобразным магнитопроводом, полюса которого образованы полюсными выступами фланцев, примыкающим к торцевым поверхностям одного или нескольких постоянных магнитов, намагничённых в осевом направлении магнитами (рис. 1, в).

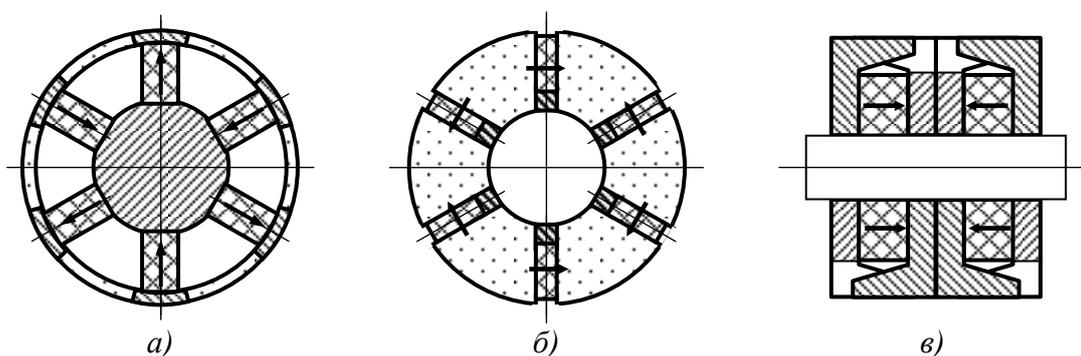


Рис. 1. Схемы конструкции магнитоэлектрического ротора

Как разновидность машин с постоянными магнитами на роторе можно рассматривать гистерезисные двигатели. Но магниты в них представлены материалом со значительно менее широкой петлёй гистерезиса (викаллой). В результате ротор гистерезисного двигателя, представляющий собой постоянный магнит цилиндрической формы, приобретает способность намагничиваться и размагничиваться под действием вращающегося поля обмотки якоря. При пуске материал ротора перемагничивается, и двигатель развивает асинхронный момент, приблизительно равный пусковому. С набором скорости частота перемагничивания ротора уменьшается. На подсинхронной скорости ротор перестаёт перемагничиваться и втягивается в синхронизм.

Помимо бесконтактности, достоинствами синхронных машин с постоянными магнитами являются пониженное потребление реактивной мощности и отсутствие электрических потерь на возбуждение.

К недостаткам магнитоэлектрических синхронных машин относятся температурная зависимость и сложность регулирования потока возбуждения, высокая стоимость энергонасыщенных магнитотвёрдых материалов.

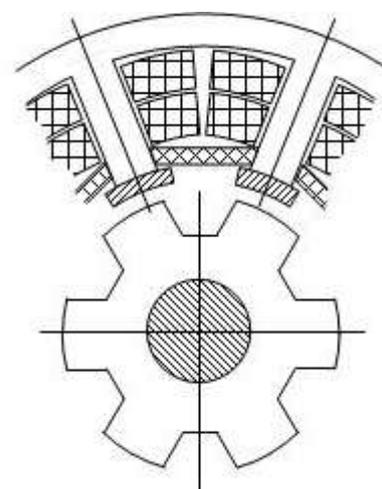


Рис. 2. Фрагмент конструкции машины с зубчатым статором и ротором

По последней причине верхним экономически целесообразным пределом единичной мощности машин с постоянными магнитами является уровень порядка 100 кВт.

Большой интерес к магнитоэлектрическим машинам возник в связи с интенсивной разработкой в настоящее время *гибридного привода автомобилей*. Совместное применение электродвигателя и бензинового двигателя позволяет уменьшить вредные выбросы, увеличить экономию топлива и обеспечить автомобилю абсолютно плавный ход. Электродвигатель обладает жёсткой механической характеристикой, поэтому его вращающий момент с ростом частоты вращения остаётся приблизительно постоянным. Вращающий момент бензинового двигателя растёт с увеличением частоты вращения, поэтому он наилучшим образом обеспечивает движение с высокой постоянной скоростью, а электродвигатель более подходит при движении на малой скорости и с ускорением. Переключением с одного двигателя на другой управляет компьютер таким образом, что электродвигатель используется при пуске и движении на невысоких скоростях. Обеспечивая необходимую тягу, он не сжигает топливо, не даёт вредных выбросов и работает бесшумно.

С увеличением скорости компьютер блока управления запускает бензиновый двигатель и отключает электродвигатель при движении с постоянной скоростью. Если необходимо резкое ускорение, например при обгоне, блок управления запускает и бензиновый двигатель, и электродвигатель, чтобы обеспечить максимальный вращающий момент.

Ко второй категории – реактивным машинам – следует отнести машины с единственной обмоткой – обмоткой якоря, в том случае, если во внешних электрических цепях, связанных с ней, отсутствуют источники постоянного напряжения, тока или выпрямительные устройства.

Действие реактивной машины основано на различии магнитного сопротивления явнополюсного ротора при замыкании магнитного потока по продольной и поперечной осям:

$$X_d > X_q.$$

Максимальный электромагнитный момент машина развивает при угле нагрузки  $\theta = \pm \frac{\pi}{4}$  радиан. В пренебрежении активным сопротивлением обмотки максимальный момент реактивной машины составит

$$M_{\max} = \frac{m_1 U^2}{2\omega} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right).$$

Наибольшую разницу сопротивлений  $X_d$  и  $X_q$ , обеспечивающую высокие значения развиваемого электромагнитного момента и мощности, можно получить при равенстве числа явно выраженных полюсов (зубцов) на роторе  $Z$  числу полюсов обмотки:

$$Z = 2p. \quad (1)$$

С полным основанием к реактивным машинам можно отнести обычную явнополюсную синхронную машину с обесточенной обмоткой возбуждения на роторе, обмотка якоря которой подключена к промышленной трёхфазной сети переменного тока и не имеет других подключений.

Другую группу конструкций реактивной машины составляют машины с зубчатым статором (рис. 3), числа зубцов на статоре  $Z_1$  и на роторе  $Z$  которых удовлетворяют соотношению

$$Z_1 \pm Z = 2p. \quad (2)$$

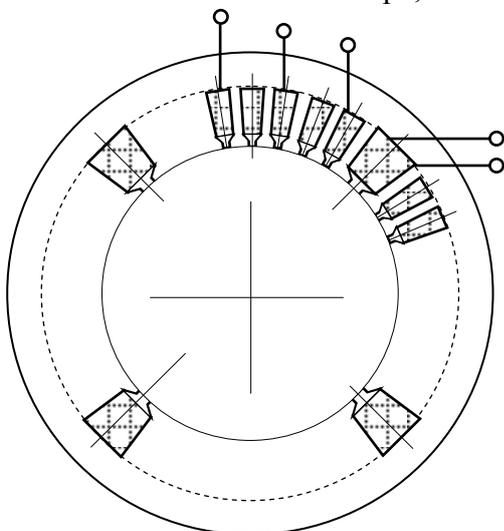
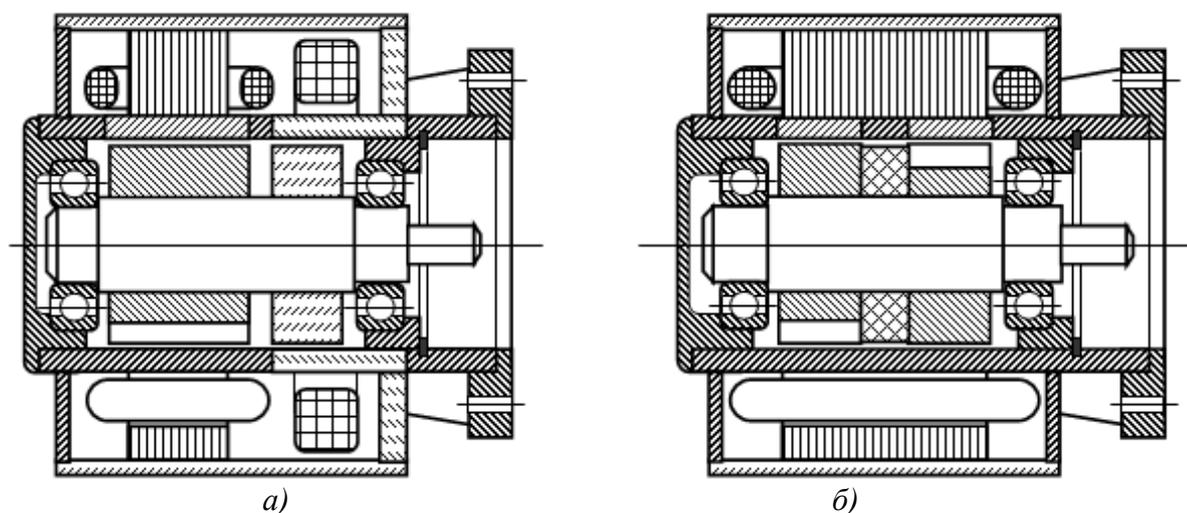


Рис. 3. Схема конструкции статора разноимённо-полюсной индукторной машины

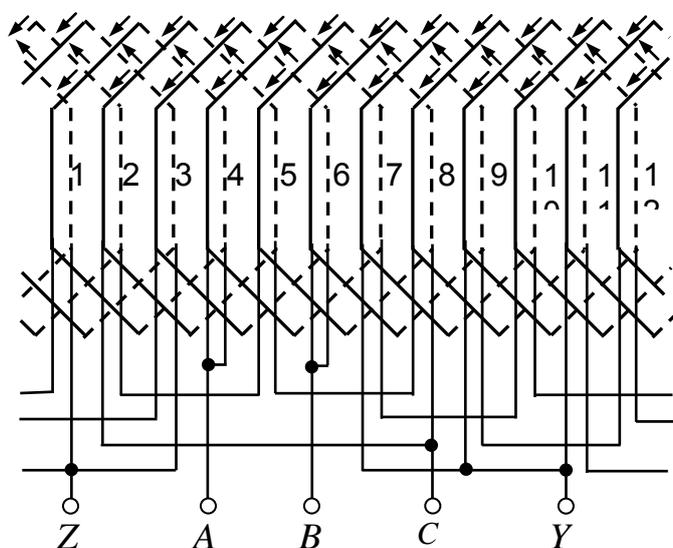
Наличие электрических цепей постоянного или выпрямленного тока, замкнутых на статорную обмотку, постоянных магнитов, не связанных с образованием на роторе полюсов чередующейся полярности, указывает на вероятную принадлежность конструкции к следующей категории бесконтактных синхронных машин – индукторным. Особенностью индукторных машин является то, что в большинстве из них и обмотка якоря, и обмотка возбуждения располагаются на статоре.



**Рис. 4. Одноимённо-полюсная индукторная машина с электромагнитным возбуждением со стороны статора (а) и с магнитоэлектрическим возбуждением со стороны ротора (б)**

Контур возбуждения индукторной машины может быть разноимённо-полюсным, с замыканием потока возбуждения в плоскости статорных листов, или одноимённо-полюсным, с замыканием потока возбуждения в радиально-осевом направлении.

В статоре разноимённо-полюсной индукторной машины, наряду с пазами под обмотку якоря, выполнены пазы большего размера под обмотку возбуждения (рис. 3).



**Рис. 5. Трёхфазно-однофазная четырёхполюсно-униполярная совмещённая обмотка одноимённо-полюсной индукторной машины**

Поток возбуждения одноимённо-полюсной индукторной машины создаётся отдельной катушкой тороидальной формы или постоянным магнитом с размещением на статоре (рис. 4, а) или на роторе (рис. 4, б) [3, 4]. Левый и правый пакеты ротора повернуты относительно друг друга на половину зубцового деления.

Поток возбуждения катушки или постоянного магнита замыкается в аксиально-радиальном направлении через внешнезамкнутый магнитопровод (элементы внешнезамкнутого магнитопровода показаны на рисунках более светлой штриховкой).

Следует отметить, что для создания потока в одноимённо-полюсной машине с электромагнитным возбуждением вовсе необязательно использовать отдельную обмотку. Для этой цели мож-

но применить совмещённую обмотку якоря (рис. 5). При питании зажимов  $Y$  и  $Z$  постоянным током эта обмотка создаёт поток, который замыкается в аксиально-радиальном направлении вокруг лобовых частей [5].

Условие однонаправленного преобразования энергии в индукторной машине с гладким статором:

$$Z = p_1 \pm p_2, \quad (3)$$

где  $Z$  – число зубцов на роторе;  $p_1$  – число полюсов якоря;  $p_2$  – число полюсов индуктора для одноимённо-полюсной машины, принимаемое равным нулю.

Индукторную машину можно выполнить также с зубчатым статором, чтобы преобразование энергии осуществлялось на одной из зубцовых гармоник. Условие такого преобразования

$$Z_2 - Z_1 = p_2 \pm p_1. \quad (4)$$

Наконец, машины, числа зубцов и полюсов которых одновременно удовлетворяют условиям преобразования энергии и в индукторной, и в реактивной, относятся к индукторно-реактивным.

К этой категории относятся машины:

- во-первых, с зубчатым статором, число зубцов которых равно числу зубцов ротора

$$Z_1 = Z_2, \quad (5)$$

с единственной обмоткой, получающей питание через выпрямительное устройство. В этом случае единственная обмотка является и обмоткой возбуждения, поскольку по ней протекает постоянная составляющая выпрямленного тока, и обмоткой якоря, поскольку по ней протекает переменная составляющая выпрямленного тока;

- во-вторых, индукторные машины, основная гармоника МДС обмотки якоря которых удовлетворяет условию работы индукторной машины (3), а одна из высших гармоник МДС, например, зубцовая, – условию однонаправленного преобразования энергии в реактивной машине (2).

Индукторные и индукторно-реактивные двигатели нередко используются в непосредственном приводе машин и механизмов с поступательным движением рабочего органа.

Кроме того, и теоретически, и практически возможно выполнить *индукторно-индукторную* машину, которая по составу зубцовых зон одновременно удовлетворяет условиям преобразования энергии и в переменно-полюсной машине, и в одноимённо-полюсной. Естественно, она должна быть снабжена внешнезамкнутым магнитопроводом.

Для того чтобы и переменно- и одноимённо-полюсные машины были способны работать в общем магнитопроводе, необходимо, чтобы при зубчатом статоре с явно выраженными полюсами переменно-полюсной обмотки возбуждения на статоре каждая из них удовлетворяла условию (4). Создать индукторно-индукторную машину при гладком статоре невозможно, так как система из двух уравнений (3), записанных для одноимённо-полюсной и для переменно-полюсной машины, не имеет решения.

Классифицировав машину, можно верно оценить её электромагнитную постоянную времени, смоделировать работу в составе электропривода. Так, индуктивность фазы одного и того же двигателя, с единственной обмоткой, имеющей несколько фаз, но в вариантах с включением катушек в фазах по схеме индукторного двигателя и по схеме индукторно-реактивного двигателя характеризуется разными связями и описывается заметно отличающимися аналитическими выражениями [1].

Если в индукторно-реактивной машине взаимоиндуктивные связи между фазами многофазной обмотки отсутствуют, то в индукторной они обеспечивают её работоспособность. Немаловажным является также и то свойство, что в индукторной машине симметрия полей пазового рассеяния в машине с единственной обмоткой обеспечивается только при чётном числе фаз, а в индукторно-реактивной – только при нечётном. Экспериментальными и расчётными методами получено и подтверждено, что асимметрия полей рассеяния может повлечь серьёзное ухудшение показателей качества движения машины в частотном приводе:

усиление автоколебаний в области высоких частот вращения. Автоколебания вызывают снижение верхней границы диапазона рабочих частот привода [6].

Для различных типов бесконтактного синхронного двигателя в частотном и шаговом приводе фазы обмотки статора переключают независимо от текущего положения ротора. В таком приводе отсутствует обратная связь между выходной величиной – положением ротора и входной величиной – состоянием ключей инвертора. Такой привод является *разомкнутым*.

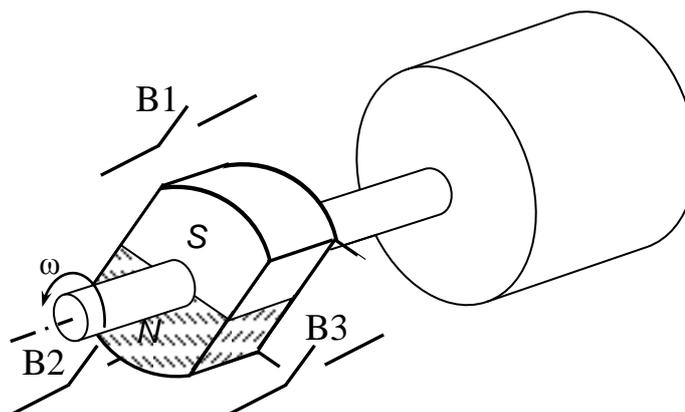


Рис. 6. Схема конструкции датчика положения ротора и его расположение на валу двигателя

Предположим теперь, что ключи  $K1 - K3$  в цепи обмотки якоря той же самой трёхфазной синхронной машины переключаются не самостоятельно, а по сигналам датчика положения, который закреплён на одном валу с ротором двигателя. Одна из многих возможных конструкций такого датчика представляет собой систему магнитоуправляемых контактов, число которых соответствует числу фаз обмотки якоря. Магнитоуправляемые контакты замыкаются под воздействием потока постоянного магнита, установленного на роторе (рис. 6).

При включении двигателя один из магнитоуправляемых контактов  $B1 - B3$  приведёт в действие (замкнёт) соответствующий ключ  $K1, K2$  или  $K3$ , подавая напряжение источника на фазу обмотки двигателя. Ротор придёт во вращение в направлении пространственной оси фазы, находящейся под напряжением. По достижении им некоторого углового положения магнит датчика разомкнёт первоначально замкнутый магнитоуправляемый контакт и замкнёт следующий. Эти контакты обесточат первую включённую фазу и подадут напряжение на следующую.

В результате этого переключения ротор продолжит вращение в направлении пространственной оси очередной включённой фазы до тех пор, пока магнит датчика положения не разомкнёт её магнитоуправляемый контакт и не замкнёт магнитоуправляемый контакт третьей фазы. Движение ротора будет продолжено теперь уже в направлении этой фазы до нового замыкания магнитоуправляемого контакта и ключа исходной фазы.

Для того чтобы ротор никогда не достигал положений с нулевым значением вращающего момента, магнитоуправляемые контакты датчика расположены под таким углом относительно пространственных осей фаз, что при приближении ротора к оси включённой фазы контакт размыкается и включается следующая по направлению вращения фаза обмотки якоря.

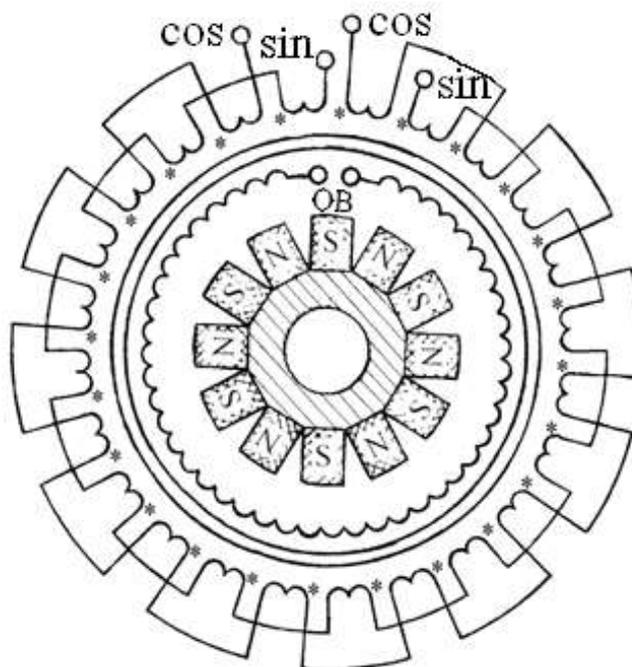


Рис. 7. Схема конструкции датчика насыщения для двух-четырёхфазной бесконтактной машины постоянного тока с восьмиполюсной обмоткой якоря

Нетрудно заметить, что с помощью датчика в таком двигателе контролируется состояние ключей, подающих напряжение на фазы. Датчик здесь выполняет функцию обратной связи по положению ротора. Без достижения ротором определённых угловых положений переключения фаз не произойдёт. Такой привод является *замкнутым*.

Наиболее надёжными являются датчики индуктивного типа. Их действие основано на изменении индуктивности фаз датчика при изменении положения ротора. Число фаз датчика всегда выбирается равным числу фаз двигателя. Можно выделить индуктивные датчики переменной проводимости воздушного зазора и датчики насыщения. Первые представляют вариант индукторной или реактивной синхронной машины. Во вторых под влиянием внешнего поля, связанного с ротором, изменяется проводимость ферромагнитных участков магнитной цепи. Основное достоинство датчиков насыщения – способность передавать сигнал через весьма большой зазор между ротором и статором, в том числе через герметичные перегородки толщиной 10 мм и более.

На кольцеобразный сердечник такого датчика (рис. 7) намотаны катушки обмотки возбуждения (ОВ) и нескольких, по числу фаз двигателя, сигнальных обмоток. Для двух-четырёхфазной машины их может быть две: синусная ( $\sin$ ) и косинусная ( $\cos$ ). Сердечник навит из ленты ферромагнитного материала, обладающего прямоугольной петлёй гистерезиса (пермаллоя).

Обмотка возбуждения получает питание от источника выпрямленного напряжения частотой несколько МГц. Катушки синусной и косинусной обмоток намотаны поверх ОВ, имеют одинаковые числа витков и чередуются между собой по окружности сердечника. Общее число катушек каждой из этих обмоток равно числу полюсов обмотки якоря двигателя. Такое же число полюсов имеет подвижная часть датчика. Она представляет собой многополюсный постоянный магнит. Его поле проникает в сердечник статора и замыкается в нём в противоположных направлениях: по часовой стрелке или против неё. В той части сегментов сердечника, где поле постоянной составляющей ОВ совпадает с направлением поля многополюсного постоянного магнита, материал сердечника дополнительно намагничивается и насыщается. Вследствие насыщения взаимоиндуктивная связь между ОВ и расположенными поблизости катушками синусной или косинусной обмотки оказывается на минимальном уровне. На минимальном уровне оказывается и напряжение, наведённое переменной составляющей тока возбуждения в обмотке (синусной или косинусной), катушки которой находятся в области насыщенных сегментов сердечника.

В сегментах сердечника, где поле постоянной составляющей тока ОВ направлено встречно потоку полюсов постоянного магнита, сердечник размагничивается. Взаимоиндуктивная связь ОВ с расположенными в области этих сегментов катушками синусной или косинусной обмоток возрастает, что вызывает увеличение напряжения, наведённого на этой обмотке переменной составляющей тока ОВ.

Поворот магнита вместе с ротором на одно полюсное деление обеспечивает смену максимума и минимума напряжения, наведённого в фазах синусной и косинусной обмоток.

Для работы с трёх- или шестифазной синхронной машиной датчик насыщения содержит три обмотки, катушки которых так же, как и в двух - четырёхфазном датчике, чередуются между собой с общим числом катушек каждой фазы, равным числу полюсов обмотки якоря двигателя.

Электромашинная (без датчика) часть бесконтактного синхронного двигателя ничем не отличается от аналогичного узла обращённой машины постоянного тока с расположением якоря на статоре (размещение его на роторе не обеспечивает бесконтактности). В связи с этим вполне уместно утверждать, что синхронная машина в замкнутом по положению ротора электроприводе является бесконтактной машиной постоянного тока.

Помимо места расположения обмотки якоря, отличие бесконтактной машины постоянного тока от контактной, с механическим коллектором, состоит в числе фаз – секций обмотки якоря. В контактной машине постоянного тока общепромышленного назначения чис-

ло секций весьма велико. По сути, они представляют собой фазы обмотки якоря синхронной машины, сопряжённые между собой в замкнутый многоугольник, поэтому пульсации момента в такой машине практически отсутствуют.

В бесконтактной машине число секций-фаз ограничено разумным числом каналов полупроводникового преобразователя, осуществляющего их переключение. Если учесть, что на переключение одной фазы требуется один усилитель, то нетрудно наложить ограничение: число фаз бесконтактной машины постоянного тока не должно превышать 4 – 6. Они должны быть соединены в звезду, так легче обеспечить независимое регулирование токов. Следствием ограниченного числа секций-фаз в приводе с синхронной машиной, работающей в качестве бесконтактного двигателя постоянного тока, являются значительные пульсации момента. Однако это отличие обусловлено особенностями конструкции обмотки якоря бесконтактной и коллекторной машин постоянного тока, а не принципом их действия.

### Выводы

Правильное определение типа бесконтактной синхронной машины в соответствии с классификацией, разработанной усилиями советских и российских учёных-электро-механиков, является вопросом не терминологии, а верного отражения процессов электро-механического преобразования энергии, а значит, и качества разработки. Ей должен предшествовать анализ конструктивных параметров машины и характера её взаимодействия с внешними устройствами, входящими в электропривод.

### Библиографический список

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями /под ред. М.Г. Чиликина. - М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов /А.В.Иванов-Смоленский. - М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. А.с.1510670 СССР, МПК<sup>7</sup> H02K 19/18. Индукторная машина. / А.Ю.Смирнов, С.Д.Истомин, В.С.Пронин (СССР). - №4329134/07; заявл.17.11.87; опубл.27.05.02. Бюл. №15 (II ч.).
4. А.с.1591709 СССР, МПК<sup>7</sup> H02K 19/06, 19/18, 21/20, 1/27. Индукторная машина / А.Ю.Смирнов (СССР). №4337584/07; заявл.07.12.87; опубл.27.05.02. Бюл. №15 (II ч.).
5. Смирнов, А.Ю. Матричный синтез и анализ многоугольников МДС трёхфазных обмоток машин переменного тока // Электричество. 2009. №5. С. 42–45.
6. Смирнов А.Ю. Влияние асимметрии полей пазового рассеяния на предельные механические характеристики индукторной машины в частотном приводе: труды НГТУ. – Н. Новгород. 2008. Т. 70. С. 44–48.

*Дата поступления  
в редакцию 26.04.2011.*

**A.Yu. Smirnov**

### THE ASPECTS OF ELECTRIC MACHINES FOR BRUSHLESS SYNCHRONOUS DRIVE CLASSIFICATION

Classification of electric machines for the brushless synchronous drive, detailed is considered in view of an opportunity of creation by one winding of the machine of two fields simultaneously. The concrete designs explaining separate items of classification are resulted, references to results of experimental and settlement researches show importance of correct definition such as the brushless synchronous machine.

*Key words:* brushless synchronous drive, classification of electric machines, reluctance self-inductive machine, reluctance mutual-inductive machine.