

# Синхронные тяговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, обладающие преимуществами в отношении массогабаритных показателей и потребления энергии, все чаще находят применение в тяговом приводе, хотя они требуют использования сложных систем управления и пока имеют недостаточную надежность.

За последние несколько лет от ведущих мировых поставщиков подвижного состава поступило много предложений, касающихся использования синхронных тяговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Такие двигатели имеют меньшие габариты и массу по сравнению с преобладавшими до сих пор на рынке трехфазными асинхронными двигателями.

СДПМ использовались, в частности, на установившем 3 апреля 2007 г. мировой рекорд скорости электропоезде AGV V150 постройки компании Alstom (рис. 1). Они находят применение на подвижном составе различного назначения

(таблица) — от трамвая-поезда Citadis Dualis (рис. 2) до двухэтажного междугородного электропоезда Twindexx (рис. 3) для железных дорог Швейцарии (SBB).

Считается, что железнодорожные компании-операторы консервативны в отношении применения новых технологий. В то же время разработчики и изготовители тягового подвижного состава заинтересованы в скорейшей реализации передовых технических решений. Если использование новых разработок способствует существенному улучшению эксплуатационных показателей, эти разработки достаточно быстро находят применение, что

подтверждается опытом внедрения импульсных преобразователей для питания тяговых двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, тяговых двигателей постоянного тока независимого возбуждения, синхронных двигателей и трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. С развитием технологий повышалась эффективность тягового привода и совершенствовалось управление им, что позволило улучшить характеристики сцепления и снизить потребление энергии.

СДПМ и электронная аппаратура управления ими представляют собой наиболее современную технологию в области тягового привода. Миллионы СДПМ благодаря своей сравнительно малой массе и хорошей управляемости уже используются в приводах гибридных автомобилей. Более крупные двигатели предоставляют такие же возможности для повышения эффективности тягового привода железнодорожного подвижного состава. Данная технология внедряется на новом подвижном составе различного назначения. Однако при этом выявились несколько существенных проблем, требующих решения.

## Основные требования

На автомобилях с двигателями внутреннего сгорания для регулирования скорости обычно используют сложное механическое устройство — коробку передач, благодаря чему двигатель может работать в оптимальном скоростном диапазоне. Тяговые двигатели подвижного состава железных дорог должны эффективно работать во всем диапазоне скорости, обеспечивая передачу крутящего момента на колеса через одноступенчатый редуктор либо непосредственно. Такое простое в плане механического оборудования решение позволяет создать надежные системы привода, не требующие сложного технического обслуживания.



Рис. 1. Высокоскоростной электропоезд AGV V150 во время рекордного пробега



Рис. 2. Трамвай-поезд Citadis Dualis (фото: Alstom)



Рис. 3. Электропоезд Twindexx (источник: Bombardier)

Таким образом, первое требование, предъявляемое при проектировании тяговых двигателей, — их способность обеспечивать крутящий момент или тяговое усилие в широком диапазоне скорости (от 0 до 320 км/ч).

Безусловно, важно, чтобы тяговый двигатель работал надежно. В то же время, с точки зрения машиниста и железнодорожной компании-оператора, в равной степени имеет значение точное и плавное регулирование момента во всем диапазоне скорости при помощи системы управления тяговым приводом. Надлежащее регулирование крутящего момента обеспечивает оптимальное использование сцепления между колесом и рельсом, плавное ускорение, способность

поддержания постоянной скорости и возможность применения электрического торможения.

### Сила тяги, мощность и скорость

При взаимодействии колес с рельсами крутящий момент тягового двигателя преобразуется в линейную силу тяги или торможения. На рис. 4 представлен график зависимости силы тяги от скорости, а также кривая сопротивления движению поезда. Кривая силы тяги пересекает кривую сопротивления движению в точке так называемой установившейся скорости, т. е. максимальной теоретически возможной скорости. Вблизи этой точки величина изменения силы тяги, за

счет которой создается ускорение поезда (на рис. 4 обозначена красной стрелкой), невелика. На рис. 5 показаны характеристики мощности тягового привода и потребной тяговой мощности (мощность равна произведению скорости и силы тяги).

Тяговые двигатели, как правило, рассчитываются на определенный режим работы. Двигатель должен развивать требуемый момент при нулевой скорости и поддерживать его до номинальной во всей зоне 1 кривой силы тяги. Выше этой скорости тяговый двигатель развивает максимальную выходную мощность. В зоне 2 сила тяги обратно пропорциональна скорости. В зоне 3 вследствие ограничений характеристик тягового двигателя сила тяги обратно пропорциональна квадрату скорости.

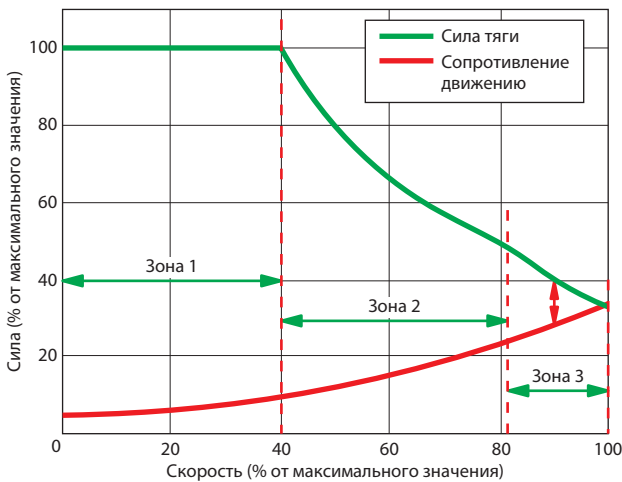


Рис. 4. Тяговая характеристика и сопротивление движению

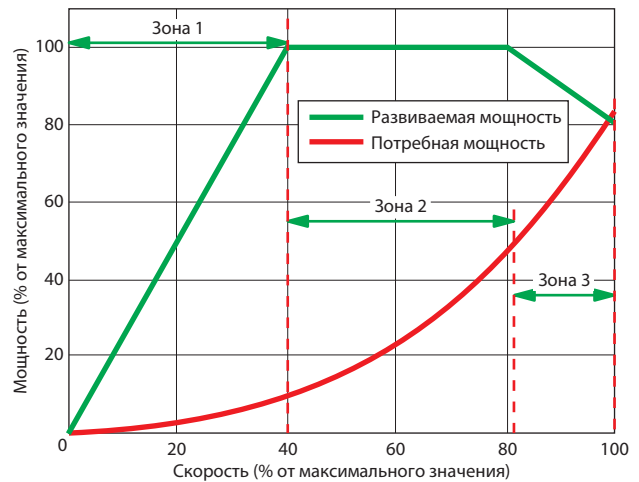


Рис. 5. Характеристики мощности

## Регулирование крутящего момента

При низкой скорости крутящий момент двигателя теоретически может быть больше, чем передаваемый при взаимодействии колеса и рельса. Однако это привело бы к перегрузке двигателя, поэтому таких режимов следует избегать посредством соответствующих действий машиниста или электронной системы управления.

Ранее для управления тяговыми двигателями постоянного тока применялось регулирование напряжения посредством изменения схемы их соединения с последовательного на параллельное и регулирование тока с помощью пускотормозных резисторов. На современном подвижном составе для управления как коллекторными двигателями постоянного тока, так и синхронными и асинхронными двигателями переменного тока используются электронные системы, обеспечивающие изменение напряжения или как напряжения, так и частоты. Применяемые ныне системы тягового электропривода позволяют

достичь качественного управления во всем диапазоне скорости при относительно простых алгоритмах регулирования.

Регулирование СДПМ позволяет достаточно легко достичь требуемых характеристик в зоне постоянного крутящего момента, однако для регулирования в зоне постоянной мощности требуются более сложные алгоритмы.

Двигатели переменного и постоянного тока, как и СДПМ, по существу работают на основе одних и тех же физических законов. Поэтому принципы управления ими до некоторой степени подобны. В электрических машинах всех видов крутящий момент возникает при взаимодействии двух магнитных полей. Для появления крутящего момента между векторами напряженности этих магнитных полей должен быть определенный угол, в идеальном случае равный 90 эл. град. Упомянутые поля могут быть созданы токами, протекающими по обмоткам двигателя, или постоянными магнитами.

В настоящее время в тяговом приводе находят применение главным образом трехфазные асинхронные двигатели. Тем не менее весьма важно понимать природу и поведение магнитных полей статора и ротора электрических машин других типов.

В традиционном двигателе постоянного тока северные и южные полюса поля статора всегда ориентированы в одном и том же направлении, в то время как поле якоря (ротора) сдвинуто на 90 эл. град вследствие использования коллектора. В двигателе последовательного возбуждения один и тот же ток проходит как через обмотку статора, так и через обмотку ротора, тогда как в случае использования двигателя независимого возбуждения имеется возможность независимо управлять полями ротора и статора.

В традиционном трехфазном синхронном двигателе магнитное поле ротора создается током,

протекающим по его обмотке, а ориентация поля определяется физическим положением обмотки ротора. Поле статора создается током, протекающим по его обмотке, и вращается со скоростью, определяемой частотой инвертора, от которого получает питание обмотка статора. Угол между полями статора и ротора увеличивается в зависимости от крутящего момента, а частоты вращения ротора и поля статора одинаковы. Когда угол становится отрицательным, двигатель переходит в тормозной режим.

В трехфазном асинхронном двигателе магнитное поле статора индуцирует в обмотке ротора ток (рис. 6), который, в свою очередь, генерирует магнитное поле. Последнее, взаимодействуя с полем статора, создает тяговый или тормозной момент. В режиме тяги частота вращения ротора ниже частоты вращения поля статора, заданной преобразователем, а в режиме торможения — выше. Крутящий момент не возникает, если частоты вращения ротора и поля статора равны. Соотношение частот вращения ротора и поля статора характеризуется величиной, называемой скольжением.

В СДПМ поле ротора создается магнитами, которые либо распределены по поверхности ротора, либо размещены в его пазах (рис. 7). В последнем случае обеспечивается большая механическая прочность и меньшие потери на вихревые токи в роторе. В качестве материала для постоянных магнитов получил распространение сплав неодим-железо-бор ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) благодаря его оптимальным магнитным свойствам. Магнитное поле статора создается с помощью трехфазной многополюсной обмотки, размещенной в пазах шихтованного сердечника.

Во всех электрических машинах вращающееся магнитное поле генерирует ЭДС, противоположную по направлению питающему напряжению — так называемую противо-ЭДС. При нулевой частоте вращения она

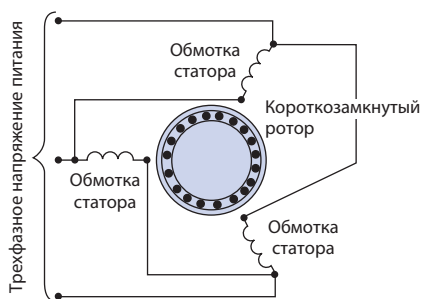


Рис. 6. Принцип работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

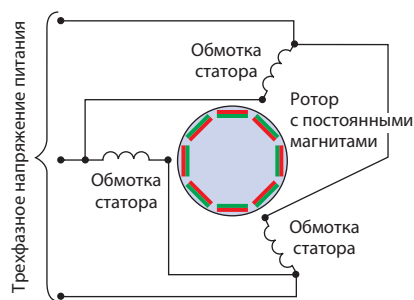


Рис. 7. Принцип работы СДПМ



равна нулю, однако с ее ростом линейно возрастает. Для поддержания постоянной величины крутящего момента в зоне 1 (см. рис. 4 и 5) следует увеличивать напряжение питания.

Крутящий момент электрической машины представляет собой произведение магнитного потока и тока. Силовой полупроводниковый преобразователь регулирует питающее постоянное или однофазное напряжение таким образом, чтобы значения тока в обмотках двигателя находились в допустимых пределах. Наиболее современным решением является использование преобразователей на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) с широтно-импульсной модуляцией.

В зоне 1, где сила тяги постоянна, напряжение (а в случае асинхронного двигателя — и частота) должно возрастать пропорционально частоте вращения двигателя, при этом значение произведения магнитного потока и тока, т. е. крутящего момента, поддерживается постоянным. При превышении номинального значения частоты вращения приложенное напряжение не может быть увеличено из-за ограничений параметров силового преобразователя и изоляции двигателя. Однако с точки зрения механических характеристик частота вращения может быть выше.

Переход в зону 2 осуществляется посредством ослабления поля, при этом уменьшается противо-ЭДС или (для СДПМ) осуществляется противодействие ее влиянию. В двигателях постоянного тока это достигается уменьшением величины тока, протекающего через обмотку возбуждения, за счет включения параллельно ей сопротивления ослабления поля, в традиционном синхронном двигателе — путем уменьшения тока в обмотке ротора. В асинхронном двигателе ослабление поля происходит автоматически с увеличением частоты тока обмотки статора, в то время как питающее напряжение

остается неизменным. В СДПМ осуществить ослабление поля сложнее, поскольку поле ротора создается постоянными магнитами.

В зоне 3 магнитный поток и ток уменьшаются быстрее, чем в зоне постоянной мощности, чтобы избежать превышения предельных электрических и механических характеристик двигателя. Например, в двигателе постоянного тока независимого возбуждения ток якоря также снижается в зависимости от скорости.

### Преимущества и недостатки

Основная причина расширения применения СДПМ в тяговом приводе — их существенные преимущества по сравнению с трехфазными асинхронными двигателями. В пределах примерно 80% рабочего диапазона КПД СДПМ больше на 1–2%, а удельная мощность — на 30–35%, вследствие чего при равной мощности габариты и масса СДПМ примерно на 25% меньше.

В асинхронном двигателе имеет место нагрев ротора вследствие наличия мощности скольжения. В СДПМ он фактически отсутствует, благодаря чему нет необходимости в охлаждении ротора. Статор СДПМ обычно полностью герметичен и имеет жидкостное охлаждение, что способствует повышению надежности двигателя. Кроме того, при использовании СДПМ возможно осуществлять электрическое торможение при низких значениях скорости, что делает принципиально возможным самоуправляемое торможение при замыкании накоротко обмоток статора. Однако достижение этих преимуществ невозможно без компромисса. Выявлены семь основных факторов, препятствующих распространению СДПМ для целей электрической тяги, хотя уже разработаны методы решения этих проблем.

Ограничения размеров и стоимости четырехквadrантного преобразователя и двигателя не позволяют

использовать их во всем диапазоне скорости только путем поддержания величины питающего напряжения, настолько превышающей противо-ЭДС, чтобы величина тока была достаточна для достижения требуемого крутящего момента. Проблема может быть решена с помощью ослабления поля, благодаря чему создаются зоны постоянного момента и постоянной мощности. Поскольку регулирование поля, создаваемого постоянными магнитами, затруднительно, ослабление поля достигается подачей тока в обмотки статора. Таким образом создается поле с вектором напряженности, направленным против вектора напряженности поля, создаваемого постоянными магнитами ротора. При этом возникают потери в меди обмотки статора, что в некоторой степени снижает положительный эффект, получаемый благодаря низким потерям при использовании ротора с постоянными магнитами.

Для управления токами, создающими эффект ослабления поля, необходимо определить положение ротора с точностью до 1–2 эл. град. Для четырехполюсного двигателя требуется механическое разрешение не менее чем 1,5 эл. град. Если использовать датчики, от них требуются весьма высокие точность и надежность, чтобы обеспечить нормальную работу системы управления. Возможно управление и без применения датчиков, однако при этом может быть снижена точность регулирования.

Магнитный поток зависит от температуры, при этом напряженность поля снижается примерно на 1% при увеличении температуры ротора на 10 К. Для СДПМ, которые работают в температурном диапазоне 200 К (от –40 до +160 °С), это имеет существенное значение. Поэтому электронная система управления должна контролировать рабочую температуру и учитывать ее при формировании управляющего сигнала.

Каждый СДПМ требует индивидуального силового полупроводникового регулятора, гарантирующего

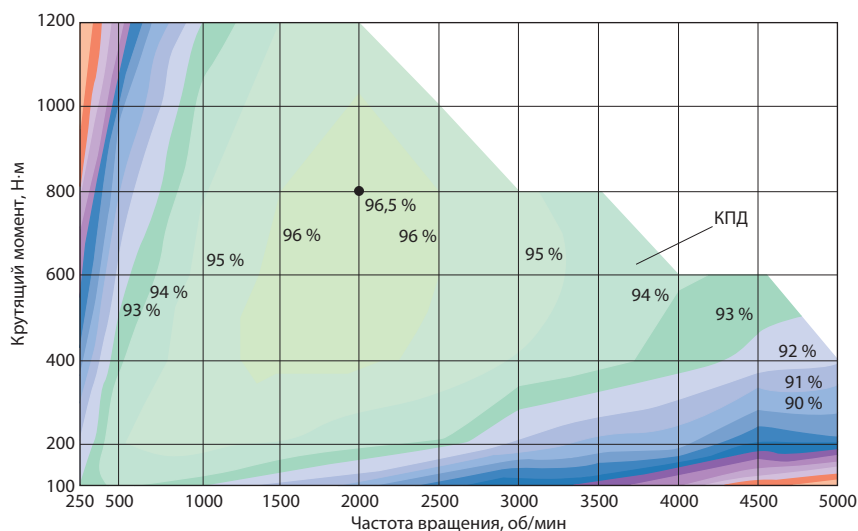


Рис. 8. Электромеханическая характеристика и КПД СДПМ

### Примеры применения тяговых СДПМ

Оператор, страна	Подвижной состав	Изготовитель
NTV (Италия)	25 высокоскоростных поездов AGV	Alstom
SBB (Швейцария)	59 двухэтажных электропоездов Twindexx	Bombardier
SNCF (Франция)	31 трамвай-поезд Citadis Dualis	Alstom
SNCF (Франция)	Электропоезда Regiolis (рамочный контракт)	Alstom
SNCF (Франция)	Электропоезда Omneo (рамочный контракт)	Bombardier
Прага (Чехия)	Низкопольные трамвайные вагоны типа 15T	Škoda
Метрополитен Токио (Япония)	Электропоезда серии 16000	Kawasaki
JR East (Япония)	Пригородные электропоезда серии E331 для Токио	Toshiba
<i>Опытные образцы</i>		
Метрополитен Мюнхена (Германия)	Электропоезд типа C19 с тележками Syntegra	Siemens
Китай	Прототип локомотива на топливных элементах	CNR Yongji
Швеция	Электропоезд Gröna Tåget	Bombardier
Турция	Низкопольный трамвай Citadis X04	Alstom
Япония	Поезд с изменяемой шириной колеи	RTRI

подачу управляющего импульса на включение силовой цепи строго в требуемый момент времени. Впрочем, в современном тяговом приводе все чаще используются индивидуальные системы управления каждым двигателем. Таким образом, эта проблема решается.

При значительных токах и высоких температурах может произойти необратимое размагничивание, даже если температура ротора не достигает точки Кюри между 310 и 370 °С. Однако более опасно короткое замыкание в обмотке статора, которое может привести к разрушению двигателя,

поскольку создаваемое постоянными магнитами вращающееся поле продолжает индуцировать значительные токи в статоре. Здесь размагничивание может быть полезным, поскольку снижает эти токи.

Еще одна проблема связана с тем, что при работе без нагрузки (когда поезд движется в режиме выбега) вращающийся ротор двигателя с постоянными магнитами продолжает индуцировать токи в сердечнике статора. Возникающие вихревые токи наряду с эффектом гистерезиса вызывают потери в стали, что снижает КПД двигателя.

Редкоземельные металлы, используемые в СДПМ, обладают хорошими магнитными свойствами, но довольно чувствительны к механическому и тепловому воздействию. Конструкция ротора у СДПМ сложнее, чем у асинхронных двигателей. Схема управления СДПМ также сложнее в связи с наличием многократных контуров обратной связи и необходимости преобразования сигнала.

Существует достаточно много областей применения, где преимущества СДПМ безусловно преобладают над их недостатками, и это делает их привлекательными для разработчиков тягового привода. Меньшие размеры и масса имеют особое значение при ограниченности пространства — например, в случае необходимости размещения двигателя на оси колесной пары без редуктора.

Более высокий КПД и меньшие потери в роторе обеспечивают существенные преимущества СДПМ с точки зрения совершенствования эксплуатационных характеристик подвижного состава и сокращения потребления энергии (рис. 8). Это видно, в частности, на примере электропоезда V150 компании Alstom. Асинхронные двигатели устанавливаются на тележках, расположенных под кузовами моторных вагонов, тогда как СДПМ могут быть размещены на тележках под узлами сочленения, что позволяет уменьшить сложность и массу тягового привода.

СДПМ могут в перспективе получить намного более широкое применение в тяговом приводе (таблица), подобно тому как в середине 1980-х годов завоевали популярность трехфазные асинхронные тяговые двигатели, пришедшие на смену двигателям постоянного тока.

S. Hillmansen et al. *Railway Gazette International*, 2011, № 2, p. 30–34; материалы Birmingham Centre for Railway Research & Education ([www.railway.bham.ac.uk](http://www.railway.bham.ac.uk)), компании Alstom ([www.alstom.com](http://www.alstom.com)) и Bombardier ([www.bombardier.com](http://www.bombardier.com)).