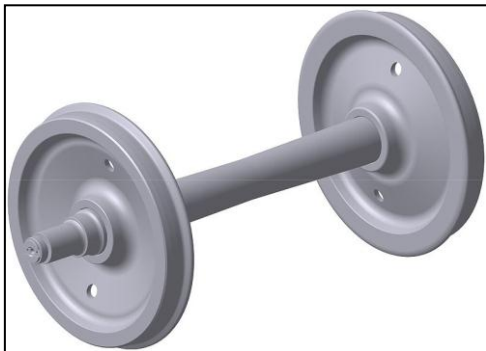


## НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛОКОМОТИВА

В статье рассматриваются вопросы, связанные с проектированием и модернизацией асинхронных и синхронных безредукторных тяговых электроприводов, применяемых в локомотивах пассажирского и грузового транспорта.



Тяговые двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами и имеющие большое число пар полюсов, позволяют реализовать безредукторный электрический тяговый привод. В этом случае достигается значительное повышение КПД и снижение массы по сравнению с редукторным приводом. Для того чтобы выполнить эти требования, необходимы тяговые двигатели большой мощности с высоким вращающим моментом, к которым относятся машины, возбуждаемые постоянными магнитами. Предпосылки

для применения постоянных магнитов в электрических машинах были созданы в 70-х годах прошлого века, когда появились магнитные материалы на базе сплавов железа, неодима и бора (FeNdB). Магниты на их основе имеют устойчивые характеристики в широком температурном диапазоне и приемлемую стоимость, серийно изготавливаются промышленностью.

Появление мощных полупроводниковых приборов, рассчитанных на большие токовые нагрузки и высокую частоту переключения (биполярные транзисторы с изолированным затвором, IGBT модули), создало условия для разработки тягового двигателя на постоянных магнитах, имеющего большое число пар полюсов [1].

Новые магнитные материалы и транзисторы IGBT (IGBT модули) позволили приступить к работам по созданию мощного тягового двигателя, возбуждаемого постоянными магнитами. Теоретические исследования показали значительные преимущества такого тягового привода по сравнению трехфазным асинхронным электроприводом:

- двигатель на постоянных магнитах может иметь намного большее число пар полюсов, чем трехфазный асинхронный. Этим обеспечивается настолько высокий вращающий момент, что становится возможной реализация безредукторного тягового привода;
- поскольку двигатель уже имеет магнитное поле возбуждения, а редуктор отсутствует, тяговый тракт обладает повышенным КПД. В свою очередь, транзисторы IGBT обеспечивают дальнейшее повышение общего КПД всей системы тягового привода;
- двигатель на постоянных магнитах, обеспечивающий повышенную мощность и вращающий момент, имеет меньшую массу и объем, чем асинхронный двигатель с редуктором;
- двигатель с ротором, возбуждаемым постоянными магнитами, может без преобразователя передавать энергию торможения на тормозные резисторы.

Рассмотренные преимущества обеспечивают следующее:

- малая масса и высокий КПД позволяют экономить энергию, затрачиваемую на тягу, и улучшать энергетические и экологические показатели тягового подвижного состава;
- малая неподрессоренная масса снижает нагрузку на железнодорожный путь;
- распределенный тяговый привод позволяет реализовать более простую концепцию электропоездов. При этом уменьшается масса тягового привода и одновременно повышается его установленная мощность. Это позволяет создавать подвижной состав с пониженным уровнем пола, в котором осевые нагрузки могут распределяться более равномерно;
- исключаются все недостатки, связанные с редукторным тяговым приводом, а именно использование дополнительного пространства, износ, загрязняющие окружающую среду потери масла, пожароопасность. Последнее обстоятельство имеет особое значение, если охлаждение двигателя на постоянных магнитах реализуется без использования масла;
- возможно простое решение системы электрического тормоза с задаваемым замедлением, поскольку двигатель в генераторном режиме надежно переключается на тормозные резисторы.

При разработке тягового двигателя на постоянных магнитах с большим числом пар полюсов определились две разные концепции:

- синхронный двигатель;
- машина с поперечным потоком.

Обе концепции различаются расположением магнитной цепи. В синхронном двигателе полюсные магниты (как в машине постоянного тока) дискретно расположены в статоре и несут на себе обмотку. Магнитный поток замыкается через них параллельно направлению вращения ротора.

В машине с поперечным потоком нет явно выраженных полюсных магнитов, несущих обмотку. Здесь статорные обмотки расположены концентрично оси вращения ротора, а магнитный поток замыкается поперечно направлению вращения ротора.

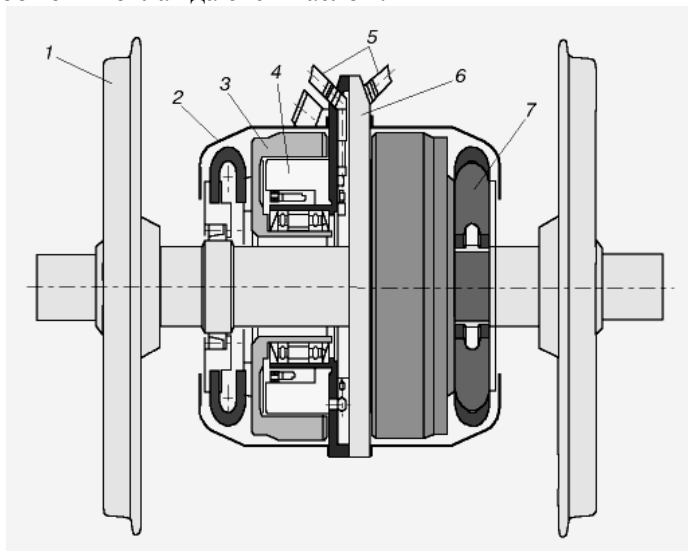
Машины на постоянных магнитах могут также различаться типом ротора:

- в машине с активным ротором все магниты расположены на роторе, а обмотки – на статоре;
- в машине с пассивным ротором все магниты и обмотки расположены на статоре.

Разработчики руководствовались следующими требованиями заказчика:

- двигатель без редуктора должен соответствовать тяговой характеристике электропоезда, т. е. развивать силу тяги при трогании 18,7 кН, продолжительную мощность 500 кВт, обеспечивать максимальную скорость движения поезда 330 км/ч +10 %;
- двигатель на постоянных магнитах должен размещаться в том же монтажном пространстве, что и обычные тяговые двигатели поезда;
- тяговый привод с двигателем на постоянных магнитах должен иметь уменьшенную массу;
- КПД тягового привода должен быть выше, чем на обычном электропоезде.

Синхронный тяговый двигатель разработан в виде двух симметричных секций мощностью по 250 кВт с полым ротором. Эти секции состыкованы на оси колесной пары и подвешены к раме тележки (рис. 1). Двигатель представляет собой машину с внешним ротором, в которой возбуждение осуществляется мощными постоянными магнитами, а обмотки охлаждаются маслом.



**Рис. 1.** Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, установленный на колёсной паре:

- 1 – колёсная пара;
- 2 – кожух двигателя;
- 3 – ротор с постоянными магнитами;
- 4 – статор с обмотками;
- 5 – элементы крепления двигателя к раме тележки;
- 6 – несущий диск;
- 7 – муфта

Внешние роторы секций имеют исполнение, обеспечивающее оптимальный вращающий момент, статоры расположены внутри. Каждый ротор имеет корпус из пластмассы, армированной стекловолокном, в нишах которого магниты закреплены на клею таким образом, что образуют кольцевой магнитный поток. Всего по окружности ротора размещено 56 высокоэнергетичных магнитов из сплава FeNdB. Дополнительно магниты закреплены бандажками, изготовленными из композитов, содержащих углеродное волокно. Благодаря этому в области бандажей не образуются вихревые токи.

Смонтированный на роторе вентилятор служит для обеспечения циркуляции воздуха внутри двигателя. Секции ротора вращаются на роликовом подшипнике, неподвиж-

ное наружное кольцо которого связано со станиной статора. Вращающий момент передается от ротора на ось колесной пары с помощью муфты.

Магнитно-активная часть статора выполнена из обычной электротехнической стали и снабжена пазами специальной формы. Обмотка, состоящая из 24 катушек, погружена в масло, т.е. имеет непосредственное масляное охлаждение. Лобовые части обмоток имеют особую форму, обеспечивающую оптимальную отдачу тепловых потерь масляной ванне. Статор уплотнен бандажами.

Пары расположенных друг против друга катушек обмотки включаются параллельно, образуя группы. Три расположенные рядом группы образуют секцию обмотки. Каждая такая секция получает питание от отдельного преобразователя на силовых транзисторах IGBT.

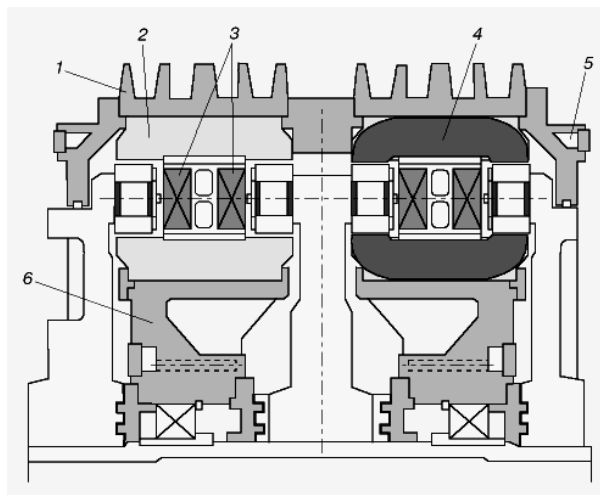
Корпус двигателя образован в основном станиной статора, кожухом и элементами подвески к раме тележки. К вводам, расположенным на корпусе, подключаются провода как силовые, так и цепей управления. Кроме того, в нижней части корпуса расположены подводы для охлаждающего масла.

С помощью системы из двух плоских кольцевых обмоток, источника питания, расположенного в корпусе тягового преобразователя, и блока оценки информации, образующих синус-косинусный вращающийся трансформатор, обеспечивается бесконтактное регулирование положения полюсов, необходимое для коммутирования двигателя.

Система контроля температуры защищает двигатель от тяжелых повреждений и гибко реагирует на временные подъемы температуры.

Двигатель с поперечным полем является электрической машиной относительно новой концепции. Его основное отличие от синхронной машины на постоянных магнитах, заключающееся в ином расположении обмотки, при заданном монтажном пространстве дает широкие возможности оптимизации двигателя в отношении массы и вращающего момента. Обеспечивая большой вращающий момент при небольших размерах, такой двигатель в наибольшей мере подходит для реализации безредукторного тягового привода.

На рис. 2 представлены основные элементы конструкции статора и ротора. Эта машина, как и рассмотренная синхронная, состоит из двух секций, каждая из которых имеет собственную магнитную цепь. Эти цепи сконструированы таким образом, что позволяют во всех режимах стабилизировать момент вращения [2].



**Рис. 2.** Двигатель с поперечным полем:  
 1 – корпус с рёбрами жёсткости и охлаждения;  
 2 – постоянный магнит;  
 3 – обмотки с расположенными между ними каналами охлаждения;  
 4 – ярмо из магнитомягкого железа;  
 5 – канал охлаждения боковой части корпуса;  
 6 – пассивный ротор

Ротор выполнен пассивным, благодаря чему достигается его высокая механическая прочность. Он набран из пакетов круглых листов электротехнической стали толщиной 0,2 мм с пазами, расположенными в соответствии с полюсным делением. Все листы каждого пакета имеют в определенном месте разрез. Это необходимо для того, чтобы в железе ротора не возникали вихревые токи, обусловленные колебаниями магнитного потока.

Пакеты железа закрепляются на дисках ротора, изготовленных из пластика, армированного стекловолокном, и дополнительно стягиваются шпильками. Три диска ротора соединены с полым валом двигателя с помощью стальных крепежных колец, имеющих

мелкие зубцы на внутренней поверхности. Когда крепежное кольцо насаживается на полый вал, зубцы входят в соответствующие пазы на поверхности этого вала.

В статоре кольцевая обмотка изнутри и снаружи охватывается магнитопроводом, образованным чередующимися стержнями из постоянных магнитов и ярмами из мягкого железа. Конструкция катушек обмотки и магнитопровода позволяет реализовать необычно большое число пар полюсов, равное 45. При этом образуемое ими магнитное поле имеет поперечное направление потока.

В ярмах сердечников происходит наложение потоков постоянных магнитов и поля, наводимого током в обмотке. Этот суммарный поток замыкается через зубцы магнитопровода ротора. Если обмотка питается переменным током, который синхронизирован с частотой вращения ротора, тогда в каждый момент времени половина постоянных магнитов статора создает усилие, действующее на ротор. Таким образом, двигатель получает момент вращения.

Наружная и внутренняя части магнитопровода в статоре соединены между собой керамическим кольцом двутаврового сечения. В нем имеются каналы охлаждения и размещены обе секции обмотки, отдающие тепловые потери охлаждающей жидкости, которая представляет собой смесь воды с гликолем. Использование керамики исключает возможность возникновения электрических потерь, вызываемых вихревыми токами, и обеспечивает относительно высокую теплопроводность. Кроме того, керамика выполняет функции электрического изолятора.

Корпус двигателя состоит из пяти частей, причем та его часть, под которой расположены элементы магнитопровода, имеет ребра, которые увеличивают жесткость конструкции и одновременно улучшают условия охлаждения. По бокам корпуса имеются каналы охлаждения, для которого здесь также используется смесь воды с гликолем. Приток к зоне ротора выполнено с применением лабиринтного уплотнения. На корпусе имеются точки крепления двигателя к раме тележки, воспринимающей реакцию вращающего момента.

Подшипники качения в двигателе электрически изолированы за счет использования шариков из керамики. Полый вал двигателя выполнен из алюминия.

Преобразователь на силовых транзисторах IGBT питает двигатель напряжением переменного тока, которое можно повышать до 1,8 кВ. Частота тока также регулируется, при этом ее максимальная величина составляет 1380 Гц.

По сравнению с трехфазными асинхронными тяговыми двигателями машины, возбуждаемые постоянными магнитами, имеют ряд принципиальных особенностей.

Вращающееся поле статора в такой машине должно быть точно синхронизировано с частотой вращения ротора и зависит от его положения. В связи с этим для каждой машины необходима система, с высокой точностью определяющая положение ротора, и отдельный преобразователь.

В машине на постоянных магнитах поле возбуждения отключить невозможно, поэтому внутрь нее всегда могут попадать магнитные загрязнители, например металлическая пыль от тормозных колодок. В связи с этим одним из обязательных условий применения таких машин является их герметичное исполнение.

Поскольку большое число пар полюсов обуславливает достаточно высокую основную частоту тока катушек, кривая которого к тому же имеет прямоугольную форму, возникает большое число гармоник широкого спектра частот. Взаимодействуя с собственными частотами элементов машины, эти гармоники могут стать причиной возникновения значительного шума. Кроме того, обусловленные ими электромагнитные воздействия не должны превышать допусков, установленных на железных дорогах.

Машина с активным ротором, т. е. несущим постоянные магниты, имеет свои дополнительные особенности. С одной стороны, такой двигатель способен переходить в режим электрического реостатного торможения при отключенном тяговом преобразователе, что позволяет причислить его к электрическим машинам, обеспечивающим надежное торможение. С другой стороны, пропорциональность частоты вращения постоянных магнитов ротора индуцируемой электромагнитной силе означает, что при снижении уровня напряжения промежуточного звена до определенной величины задаваемые значения частоты вращения и соответственно скорости движения поезда не могут быть достигнуты. В связи с этим режим напряжения промежуточного звена должен надежно кон-

тролироваться, а в процессе регулирования двигателя по возможности чаще должны использоваться возможности ослабления поля.

При отключенном тяговом преобразователе активный ротор возбуждает в железе статора вихревые токи, величина которых зависит от частоты вращения двигателя, работающего в режиме холостого хода, т.е. когда поезд движется на выбеге. Возникающие при этом тепловые потери должны отводиться системой охлаждения во избежание термических повреждений двигателя.

При коротком замыкании в обмотках статора также возможны термические повреждения, так как даже при отключенном тяговом преобразователе подпитка короткозамкнутой обмотки током продолжается в результате вращения магнитов ротора. Таким образом, для машины с активным ротором необходим надежный отвод тепловых потерь в режиме короткого замыкания [3].

В таблице 1 приведены основные технические данные двигателей на постоянных магнитах обоих рассмотренных типов в сравнении с характеристиками типового асинхронного тягового двигателя поезда. Синхронный двигатель на постоянных магнитах обладает следующими преимуществами:

- более высоким в среднем на 3 % КПД;
- меньшей на 270 кг (25 %) массой;
- меньшей на 50 мм (7 %) длиной.

Двигатель с поперечным полем имеет:

- более высокий (на 5 %) КПД;
- меньшую на 650 кг (60 %) массу;
- меньшую на 350 мм (50 %) длину.

Таблица 1

Параметр	Тип двигателя		
	Типовой асинхронный двигатель с редуктором	Синхронный двигатель с постоянными магнитами	Двигатель с поперечным полем
Номинальная мощность, кВт	500	500	500
Передаточное число редуктора	1 : 2,79	без редуктора	без редуктора
Пусковой момент, кН·м	3,2	9	9
Максимальная частота вращения, об/мин	5880	2300	2300
Масса, кг:			
тягового двигателя	750	800	400
редуктора	300	без редуктора	без редуктора
муфты	50	30	50
КПД, %:			
тягового двигателя	94,5	94,5	96,5
редуктора	97	без редуктора	без редуктора
общий	91,5	94,5	96,5
Наружный диаметр двигателя, мм	560	610	700
Осевая длина, мм:			
двигателя	600	650	380
редуктора	100	без редуктора	без редуктора
Внутренний диаметр полого вала, мм	цельный вал	200	150

### Заключение

Обе спроектированные машины при испытаниях на стендах полностью подтвердили принципиальную возможность использования их в качестве тяговых двигателей. Подтвержден также ожидаемый потенциал улучшения характеристик по сравнению с существующим уровнем тяговой техники. По степени готовности к практическому использованию в тяговом приводе синхронная машина на постоянных магнитах превосхо-

дит машину с поперечным полем, которая, однако, оказалась лучшей по максимальному КПД, массе и объему.

Важным эксплуатационным аспектом является вращение активного ротора при отключенном тяговом преобразователе, требующее надежных мер защиты от термических перегрузок, вызываемых вихревыми токами и короткими замыканиями в обмотке.

Внедрение тяговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов станет реальным, если будут обеспечены совместимость этой технологии с существующими условиями эксплуатации тягового подвижного состава.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Т. Koch et al. Eisenbahningenieur // Berlin, 2007.
2. Т. Klockow et al. Elektrische Bahnen // Berlin, 2003.
3. Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загривный Э.А. Электрические машины // СПГТИ им. Г.В. Плеханова, 2006.

*А.М. МАРКОВ*

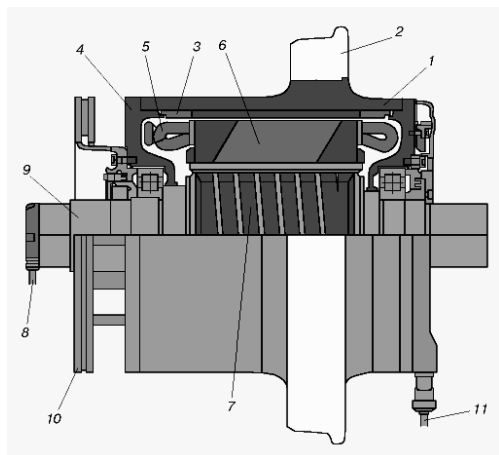
**СТУПИЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ РОТОРОМ И ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

В статье рассматриваются вопросы, связанные с проектированием и модернизацией асинхронного двигателя обращенной конструкции с водяным охлаждением, предназначенного для электропривода городского трамвая.



Несмотря на посткризисное состояние мировой экономики, ведущие мировые производители экологически чистого городского транспорта планомерно и уверенно продолжают разработку новых двигателей, способных как улучшить комфортность перемещения пассажиров, так и уменьшить затраты на изготовление и эксплуатацию. Австрийское отделение компании Bombardier Transportation Austria в последние годы спроектировало и изготовило для вагонов трамвая с низким уровнем площади пола специальный вид тягового привода типа 8 WXA 3442. Он базируется на трехфазном асинхронном двигателе с внешним ротором и жидкостным охлаждением [1], который приводит во вращение одно колесо (рис. 1).

который приводит во вращение одно колесо (рис. 1).



**Рис. 1.** Продольный разрез ступичного асинхронного привода:

- 1 – цилиндр корпуса внешнего ротора;
- 2 – колёсный бандаж;
- 3 – стержни короткозамкнутой роторной обмотки типа «беличья клетка»;
- 4 – вращающийся подшипниковый щит;
- 5 – лобовая часть статорной обмотки;
- 6 – пакет железа статора;
- 7 – труба рубашки охлаждения;
- 8 – штекерный разъём подвода питания;
- 9 – полая ось;
- 10 – тормозной диск;
- 11 – подвод охлаждающей жидкости

Концепция привода характеризуется тем, что частота вращения ротора тягового двигателя равна частоте вращения колеса. Благодаря этому отпадает необходимость в редукторе [2]. Такая конструкция обеспечивает пониженный уровень шума и значительно