

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*

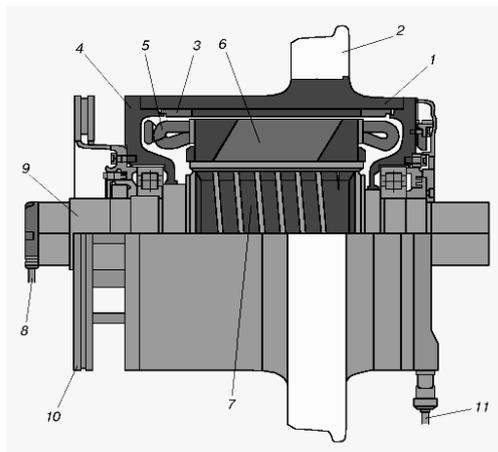
**СТУПИЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ РОТОРОМ И ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

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).

двигателем [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

меньшие эксплуатационные расходы по сравнению с классическим приводом. Все компоненты тягового привода, а именно двигатель, элемент, передающий крутящий момент на ступицу, осевой подшипник, тормозные диски и т. д., интегрированы в компактный модуль.

В конструкцию такого компактного модуля включены следующие составляющие:

**Статор.** В ступичном асинхронном тяговом двигателе расположенный внутри статор состоит из следующих элементов:

- неподвижного полого вала с трубой, образующей рубашку охлаждения;
- шихтованного магнитопровода со стягивающими кольцами;
- статорной обмотки с соединителями, токоподводами и штекерным разъёмом;
- элементов уплотнения осевого подшипника.

Через полый вал двигателя с приваренной к нему трубой охлаждения жидкость подается к неподвижным частям тягового двигателя. Магнитопровод на винтах крепится к трубе охлаждения и с помощью двух колец фиксируется в продольном направлении. Обмотка статора с изоляцией класса Н ( $t_{\max} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) размещена в пазах магнитопровода и токоподводами соединена со штекерным разъёмом.

**Ротор.** Конструкцию ротора образуют:

- цилиндр корпуса с пазами для обмотки;
- стержни и короткозамыкающие кольца обмотки типа «беличья клетка»;
- вращающиеся подшипниковые щиты.

Цилиндр корпуса, выполненный из высокопрочной стали, имеет внутренние пазы, в которых расположены стержни, образующие короткозамкнутую обмотку. На наружной поверхности цилиндра сделан кольцевой прилив, на который напрессовывается колесо, образованное бандажом, резиновым шумогасящим элементом и стопорным кольцом. С обоих торцов цилиндр корпуса закрывается подшипниковыми щитами, которые крепятся с помощью винтов.

В щите, расположенном со стороны оси пути, смонтирован плавающий (в осевом направлении) подшипник, в наружном – фиксированный. Оба роликовых цилиндрических подшипника имеют двойные лабиринтные кольца, исключая потери смазки и защищающие подшипники от попадания пыли и других загрязнений. Для пополнения смазки на каждом подшипнике предусмотрены смазочные отверстия.

**Вспомогательные устройства.** Низкоомное шунтирующее соединение между бандажом колеса и трубой корпуса ротора образовано медным заземляющим контактом, который скользит по медному кольцу. Это защищает подшипники от нежелательного протекания через них обратного тока [3]. На двигателе со стороны, обращённой к оси пути, установлен диск датчика импульсов, с помощью которого измеряется частота вращения и определяется его направление. Может использоваться и современная интеллектуальная система регулирования.

Общая масса каждого приводного блока мотор – колесо составляет 510 кг (без бандажа). Активные элементы двигателя (магнитопровод, обмотки, электрические соединители и т. д.) имеют массу лишь 210 кг. Остальное приходится на пассивные элементы, которые большей частью используются и в колесах традиционного исполнения.

Таблица 1

Технические данные ступичного тягового электропривода	
Наружный диаметр цилиндра корпуса, мм	440
Длина двигателя, мм	460
Число полюсов	8
Схема включения обмоток статора	«звезда»
Расход охлаждающей жидкости (вода/этиленгликоль), л/мин	15
Номинальная мощность двигателя, кВт	35
Частота вращения при номинальном режиме, об/мин	240
Номинальное напряжение двигателя, В	380
Номинальный ток двигателя, А	100

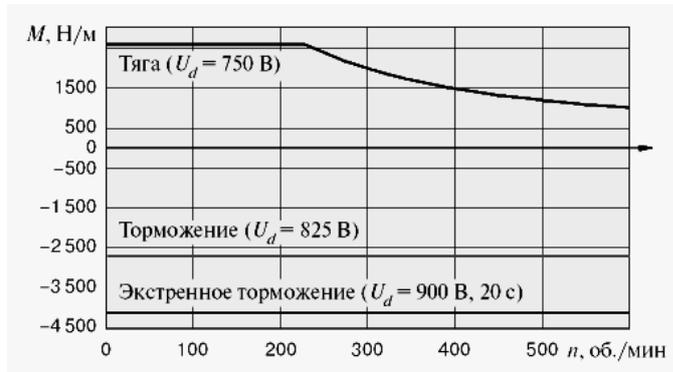
### Основные характеристики ступичного тягового электропривода

#### Электрическая часть

Ступичный тяговый привод специально разработан для подвижного состава, используемого на линиях с номинальным напряжением в контактной сети 600 или 750 В

постоянного тока. При этом магнитный поток в двигателе устанавливается независимо от колебаний напряжения в контактной сети в той степени, в которой это допускает система регулирования напряжения преобразователя (инвертора).

На рис. 2 приведены кривые зависимости крутящего момента  $M$  двигателя от частоты вращения  $n$  для режимов тяги, служебного и экстренного торможения.



**Рис. 2.** Характеристики двигателя при напряжении сети 750 В постоянного тока:  
 $M$ , Н/м – крутящий момент;  
 $n$ , об/мин – частота вращения;  
 $U_d$ , В – напряжение в контактной сети

### Механическая часть и система торможения

При расчете вала ступичного двигателя использовались критерии, принимаемые для оси колесной пары в системах с традиционными видами привода. Для его изготовления выбрана высокопрочная сталь с пределом текучести при растяжении 700 – 800 Н/мм<sup>2</sup>.

В ступичном приводе вал двигателя воспринимает не только статические вертикальные нагрузки, но и значительные моменты при трогании и торможении. Его расчет выполнен по методу конечных элементов. Этим же методом рассчитан цилиндр корпуса внешнего ротора и подшипниковые щиты. При этом учтены усилия напрессовки бандажа, статическая вертикальная нагрузка 50 кН и горизонтальная 45 кН, действующая на оба торца корпуса при движении вагона в кривых и по стрелочным переводам.

Помимо этого, выполнены расчеты напряжений и деформаций, которые могут возникнуть при ударной нагрузке 500 кН на бандаж колеса и корпус двигателя (при сходе с рельсов). Такая ударная нагрузка соответствует ускорению двигателя с бандажом (620 кг) около 80g (800 м/с<sup>2</sup>). При этом возникают напряжения, не превышающие 100–150 Н/мм<sup>2</sup>, что говорит о достаточном запасе прочности для стали с пределом текучести 700–800 Н/мм<sup>2</sup>. Для подшипниковых щитов обеспечены такие же параметры прочности.

Статор двигателя вагона трамвая зафиксирован в механизме подвески шестигранным зажимом, через который передаются нагрузки от колеса, взаимодействующего с путем. Электрический разъем, размещенный на торце неподвижного вала, закрыт прочной герметичной крышкой. С другого конца находится штуцер для подвода охлаждающей жидкости. Контур охлаждения включает в себя два двигателя, охлаждаемые последовательным потоком, который, в свою очередь, параллельно соединен с другой последовательно охлаждаемой парой двигателей. Кроме того, к контуру подключены два тяговых преобразователя (инвертора), питающих эти четыре двигателя.

Электродинамический тормоз используется в качестве служебного и позволяет выполнять торможение почти до полной остановки вагона. На тяговых двигателях дополнительно установлены тормозные диски. Этот тормоз используется в качестве вспомогательного, а также стояночного.

### Опыт эксплуатации и техническое обслуживание

Опытные поездки вагона выполнялись в 2004 и 2005 гг. При этом проводились измерения температуры, а также исследовались величины ускорений на оси привода. В ходе испытаний при прохождении вагона по стрелкам или глухим пересечениям со скоростью 20–30 км/ч ускорение двигателя с колесом без резинового виброгасящего элемента в вертикальном направлении составило 22g. Также испытывались колеса, имеющими резиновые элементы жесткостью 200 кН/мм. Таким образом, действие вертикальной силы 50 кН вызывало их сжатие на 0,25 мм. В этой серии испытаний были получены максимальные ускорения величиной до 15g. В среднем использование резинового элемента дает снижение величины ускорений на 15–20 %.

Важным критерием для оценки ступичного привода была механическая прочность при ударных нагрузках, возникающих в результате схода вагона с рельсов. Когда вагон на скорости 30 км/ч сошёл с рельсов из-за выброса пути, он под действием сил инерции двигался еще 110 м, при этом корпуса двух двигателей опирались на рельсы и скользили по ним. Эти двигатели были демонтированы и направлены для проверки на завод-изготовитель. Результаты полной разборки и обмера всех деталей показали отсутствие деформаций или иных повреждений.

В испытательных поездках особый интерес представляли измерения температурных параметров, прежде всего наружной поверхности ротора, т. е. цилиндра корпуса. Исследовалась работа двигателей полностью загруженного вагона при трогании на подъёме. Измерения показали, что температура корпуса ротора, стопорного кольца и колесного бандажа оставалась с достаточным запасом ниже допустимой максимальной температуры, установленной для резинового элемента. Максимальная температура бандажа во время этого эксперимента ни разу не превысила 60 °С при температуре воздуха +25–30 °С.

Используемые в двигателях цилиндрические роликовые подшипники рассчитаны на пробег не менее 1,3 млн. км. При среднем годовом пробеге 50 тыс. км это соответствует сроку службы, превышающему 20 лет. Смазку в подшипники добавляют через два отверстия, расположенные диаметрально на цилиндрической поверхности подшипниковых щитов после пробега 300 тыс. км, т. е. через каждые 4 года. Полностью смазку заменяют после пробега 600 тыс. км, соответственно через 8 лет. Этот срок для вагонов трамвая соответствует интервалу между капитальными ремонтами. Общие затраты времени на пополнение смазкой всех моторных подшипников в вагоне с восемью двигателями составляют не более двух часов.

### **Заключение**

Концепция рассмотренного электропривода характеризуется тем, что частота вращения ротора тягового двигателя равна частоте вращения колеса. Благодаря этому отпадает необходимость в редукторе. Такая конструкция обеспечивает пониженный уровень шума и значительно меньшие эксплуатационные расходы по сравнению с классическим приводом. Все компоненты тягового привода, а именно двигатель, элемент, передающий крутящий момент на ступицу, осевой подшипник, тормозные диски и т. д., интегрированы в компактный модуль.

Длительные экспериментальные исследования на натуральных объектах, а также опыт эксплуатации трамваев со ступичными асинхронными тяговыми двигателями с внешним ротором и жидкостным охлаждением подтвердили правильность инженерных расчётов, принятых конструкторских и технологических решений.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Neudorfer N. Glasers Annalen // Berlin, 2006.
2. Волотковский С.А. Типовой электропривод промышленных установок. – К.: Высшая школа, 1983.
3. Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загривный Э.А. Электрические машины // СПбГИ им. Г.В. Плеханова, 2006.

*Л.В. МОТАЙЛЕНКО, В.Н. СОФБИНА, М.С. КУЗНЕЦОВ*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕСТИРУЮЩИМ СИСТЕМАМ РАЗВИТИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА**

Определена актуальность создания тестирующих информационных систем на современном этапе развития профессионального обучения. Проведен анализ существующих систем, выявлены их возможности. Выработаны требования к вновь создаваемым информационным тестирующим системам.

Подготовка бакалавров и магистров по техническим направлениям, в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования (ГОС ВПО), ставит перед вузами задачу выпуска специалистов отвечающих требованиям к результатам освоения основных образовательных программ.