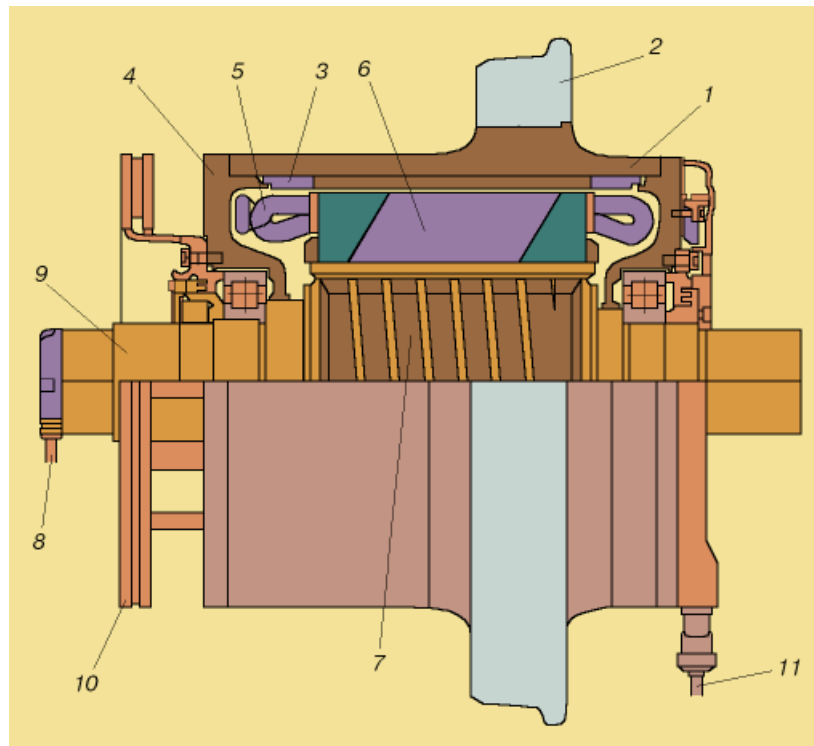


## СТУПИЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ РОТОРОМ

В 1993 г. транспортная компания г. Хемница (Германия) получила первый вагон трамвая модульной конструкции семейства Variobahn. Он разработан и изготовлен в Берлине компанией ABB Henschel (ныне входит в состав Bombardier). В виде отдельных модулей выполнены лобовые части, ходовая часть и секции пассажирских салонов. Концепция Variobahn соответствовала уровню техники того периода и позволяла за короткое время переоборудовать вагоны в соответствии с колебаниями пассажиропотоков.

Австрийское отделение компании Adtranz, ныне Bombardier Transportation Austria, разработало для вагонов трамвая с низким уровнем всей площади пола специальный вид тягового привода типа 8 WXA 3442. Он базируется на трехфазном асинхронном двигателе с внешним ротором и жидкостным охлаждением, который приводит во вращение одно колесо (рис. 1 и 2).



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

1 — труба корпуса внешнего ротора; 2 — колесный бандаж; 3 — стержни короткозамкнутой роторной обмотки; 4 — вращающийся подшипниковый щит; 5 — лобовая часть статорной обмотки; 6 — пакет железа статора; 7 — труба рубашки охлаждения; 8 — штекерный разъем подвода питания; 9 — полая ось; 10 — тормозной диск; 11 — подвод охлаждающей жидкости



**Рис. 2. Общий вид ступичного привода с тормозным диском**

Вагоны Variobahn с тяговым приводом такого типа, кроме Хемница, эксплуатируются в Дуйсбурге, Хельсинки и Сиднее. Концепция привода 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.

## **Конструкция**

### *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 разъемом для подключения;
- 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 200 размещена в пазах магнитопровода и токоподводами соединена со штекерным разъемом.

### *Ротор*

Конструкцию ротора образуют:

- труба корпуса с пазами для обмотки;
- стержни и короткозамыкающие кольца обмотки;
- вращающиеся подшипниковые щиты.

Труба корпуса, выполненная из улучшенной стали, имеет внутренние пазы, в которых расположены стержни, образующие короткозамкнутую обмотку. На наружной поверхности трубы сделан кольцевой прилив, на который насаживается колесо, образованное бандажом, резиновым шумогасящим элементом и стопорным кольцом. С обоих торцов труба корпуса закрывается подшипниковыми щитами, которые крепятся к ней 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, исключаящие 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. На двигателе со стороны, обращенной к оси пути, установлен диск датчика импульсов, с помощью которого измеряется частота вращения и определяется его направление. В вагонах Variobahn, изготовленных для Хельсинки, этот датчик отсутствует, так как поезда оснащены более современной интеллектуальной системой регулирования двигателей.

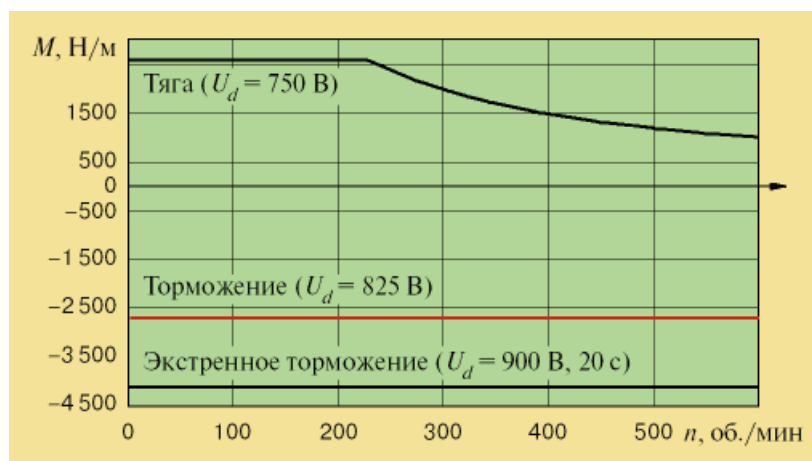
| Технические данные ступичного тягового привода       |        |
|--|--------|
| Наружный диаметр трубы корпуса, мм                   | 440    |
| Длина двигателя, мм                                  | 460    |
| Число полюсов  | 8      |
| Схема включения обмоток статора                      | звезда |
| Расход охлаждающей жидкости (вода с гликолем), л/мин | 15     |
| Номинальная мощность двигателя, кВт                  | 35     |
| Частота вращения номинального режима, об/мин         | 240    |
| Напряжение на двигателе, В                           | 380    |
| Номинальный ток двигателя, А                         | 100    |

Общая масса каждого приводного блока мотор — колесо составляет 510 кг (без банджа). Активные элементы двигателя (магнитопровод, обмотки, электрические соединители и т. д.) имеют массу лишь 208 кг. Остальное приходится на пассивные элементы, которые большей частью используются и на немоторных колесах.

## Основные характеристики

### 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. Минимальное допустимое напряжение составляет 420 В, максимальное 900 В. 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.



**Рис. 3. Характеристики двигателя при напряжении сети 750 В постоянного тока:**  
 $M$  — крутящий момент;  $n$  — частота вращения;  $U_d$  — напряжение в контактной сети

На рис. 3 приведены кривые зависимости крутящего момента двигателя от частоты вращения для режимов тяги, служебного и экстренного торможения.

### 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 рассчитана труба 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  $80g$  ( $800 \text{ м/с}^2$ ). При этом возникают напряжения, не превышающие  $100 - 150 \text{ Н/мм}^2$ , что говорит о достаточном запасе прочности для стали с пределом текучести  $700 - 800 \text{ Н/мм}^2$ . Для подшипниковых щитов обеспечены такие же параметры прочности.

Статор двигателя вагона трамвая Variobahn зафиксирован в механизме подвески шестигранным зажимом, через который передаются нагрузки от колеса, взаимодействующего с путем. Электрический разъем, размещенный на торце неподвижного вала, закрыт прочной 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, 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, на которые воздействует пружинный аккумулятор. Этот тормоз используется в качестве вспомогательного и стояночного.

## **Опыт эксплуатации и техническое обслуживание**

Опытные поездки вагона Variobahn выполнялись в Хемнице в 1994 и 1995 гг. При этом проводились измерения температуры, а также исследовались величины ускорений на оси привода.

В ходе испытаний 1994 г. при прохождении вагона по стрелкам или глухим пересечениям со скоростью  $20 - 30 \text{ км/ч}$  ускорение двигателя с колесом без резинового виброгасящего элемента в вертикальном направлении составило  $22g$ .

В 1995 г. испытания проводились с колесами типа Vochum 84, имеющими резиновые элементы жесткостью  $200 \text{ кН/мм}$ . Таким образом, действие вертикальной силы  $50 \text{ кН}$  вызывало их сжатие на  $0,25 \text{ мм}$ . 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 в Хемнице вагон Variobahn на скорости  $30 \text{ км/ч}$  сошел с рельсов из-за выброса пути, он под действием сил инерции двигался еще  $110 \text{ м}$ , при этом корпуса двух двигателей опирались на рельсы и скользили по ним. Эти двигатели были демонтированы и направлены для проверки на завод-изготовитель в Вене. Здесь 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. трубы корпуса. Во время поездок в августе 1995 г. в Хемнице исследовалась работа двигателей полностью загруженного вагона при трогании на подъеме. 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  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  при температуре воздуха  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В настоящее время в вагонах Variobahn транспортной компании Хемница эксплуатируется более 200 ступичных двигателей, в Сиднее 60, в Хельсинки 240 и в Дуйсбурге восемь.

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 2 ч.

*H. Neudorfer. Glasers Annalen, 2001, № 6/7, S. 237 – 242*