

4. **ГОСТ 18105-2010.** Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М. : Стандартинформ, 2013. – 20 с.

5. **Применение** ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля / В.В. Дзенис ; Риж. политехнич. ин-т им. А. Я. Пельше. – Рига : Зинатне, 1987. – 263 с.

6. **Michas G.** Slab track system for High Speed railways / Royal Inst. Technol. (KTH). – Sweden, Stockholm, 2012. – 107 p.

7. **Проблемы** эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали / А. Ф. Колос, Т. М. Петрова, А. А. Сидоренко // Техника железных дорог. – 2013. – № 2 (22). – С. 42–47.

УДК 629.423.31

**Р. И. Прошутинский, О. В. Колодкин**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МАГИСТРАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Рассмотрены вентильные тяговые двигатели и их применение на отечественном и зарубежном опытном и серийном электрическом подвижном составе магистральных железных дорог. Выделены характерные особенности электромеханических преобразователей электроэнергии существующих вентильных тяговых двигателей. Описаны принципиальные схемы полупроводниковых преобразователей. Исходя из опыта проектирования и эксплуатации вентильных тяговых двигателей, предложена возможная область их применения на отечественных железных дорогах на современном этапе.

вентильный тяговый двигатель, электромеханический преобразователь энергии, контактное электромагнитное возбуждение, полупроводниковый преобразователь, однооперационный тиристор, электровоз.

### **Введение**

В настоящее время за рубежом эксплуатируется электрический подвижной состав (ЭПС) с вентильными тяговыми двигателями (ВТД).

Вентильный тяговый двигатель включает в себя электромеханический преобразователь энергии (ЭМП) и полупроводниковый преобразователь, переключающий фазы статорной обмотки тягового электродвигателя (ТЭД) в зависимости от углового положения ротора.

В статье рассматриваются существующие на данный момент ВТД, выделяются ключе-

вые особенности их ЭМП и преобразователей, а также предлагается область их применения на отечественных железных дорогах в настоящее время.

### **1 Мировой опыт применения ВТД на ЭПС**

В трех странах (СССР/России, Франции и Японии) работы над ВТД были доведены до построения опытных образцов ЭПС. Серийно ЭПС с ВТД производился только во Франции.

В СССР вентильные двигатели создавались в качестве замены коллекторных двигателей в приводе серийных грузовых электровозов переменного тока 25 кВ 50 Гц с целью повышения их мощности за счет увеличения осевой силы тяги. В ходе работ над этой темой в 1967–1976 гг. построены макетная четырехосная секция ВЛ80 Б-216 и опытные двухсекционные восьмиосные электровозы ВЛ80 В-661, 1129, 1130 (обозначение ВЛ80 В также имели ранее построенные опытные электровозы с регулированием напряжения трансформатора на высокой стороне). Кроме того, для изучения перспективности применения группового тягового привода на отечественных железных дорогах в 1976 г. создан опытный двухсекционный восьмиосный электровоз ВЛ83-001 переменного тока 25 кВ 50 Гц.

Во Франции вентильные двигатели изначально проектировались для грузопассажирских электровозов с групповым приводом в качестве замены двухъякорных машин постоянного тока с переключаемым редуктором. В течение 1980-х годов построены и испытаны опытные электровозы: односистемный (25 кВ 50 Гц) ВВ10004 и двухсистемные (1,5/25 кВ 50 Гц) ВВ22011, ВВ22012. Итогом этих работ стало производство в конце 1980-х годов двухсистемных (1,5/25 кВ 50 Гц) четырехосных грузопассажирских электровозов с групповым приводом на две оси ВВ26000 SyBic (от фр. Synchrone Bicourant).

Параллельно с середины 1980-х до конца 1990-х годов создавалось семейство высокоскоростных поездов с тяговым приводом на основе ВТД. Применение ВТД позволило в габаритах коллекторных ТЭД реализовать большую мощность, благодаря чему стало возможным увеличение в поездах TGV Atlantique по сравнению с TGV PSE числа промежуточных вагонов при одновременном сокращении числа обмоточных осей. Были созданы следующие семейства поездов TGV с ВТД: Atlantique, Reseau, Duplex (до поколения Dasye), PBA (для использования на территории Франции, Бельгии, Нидерландов), Thalys

PBKA (для использования на территории Франции, Бельгии, Германии, Нидерландов), а также AVE S100 для железных дорог Испании (на основе TGV Atlantique) и КТХ-1 (TGV-K) для железных дорог Южной Кореи (на основе TGV Reseau). В их состав входили промежуточные пассажирские вагоны и два четырехосных локомотива с индивидуальным приводом, расположенные по концам поезда (восемь обмоточных осей). В поезде КТХ-1 тяговые двигатели дополнительно установлены на ближайšie к электровозам две двухосные тележки пассажирских вагонов, таким образом, общее число обмоточных осей составляет 12. Электрооборудование вышеперечисленных поездов рассчитано на работу от следующих систем тягового электроснабжения: постоянного тока 1,5 кВ (TGV Atlantique, Reseau, Duplex, PBA, Thalys PBKA); постоянного тока 3 кВ (TGV PBA, Thalys PBKA, AVE S100); переменного тока 15 кВ 16,7 Гц (TGV Thalys PBKA); переменного тока 25 кВ 50 Гц (все поезда TGV, AVE S100); переменного тока 25 кВ 60 Гц (КТХ-1).

В 1996–1997 гг. в России построены опытные скоростные пассажирские электровозы ЭП200-001, 002 переменного тока 25 кВ 50 Гц с ВТД и индивидуальным тяговым приводом.

В Японии в начале 1970-х годов одна из двух тележек четырехосной электросекции Кумоуа 791 переменного тока 20 кВ 60 Гц была оснащена вентильными двигателями для проведения испытаний.

В таблице приведены параметры тяговых приводов ЭПС с ВТД.

## 2 Анализ решений, примененных в существующих ВТД

2.1 ЭМП существующих ВТД представляют собой синхронную машину нормального исполнения с фазной обмоткой на статоре и обмоткой возбуждения, размещенной на роторе в оси  $d$  и питаемой через щетки и контакт-

## Параметры тяговых приводов с ВТД

ЭПС	ВЛ80 Б	ВЛ80 В	Кумоюа 791	ВЛ83	ВВ 26000	TGV Atlantique	ЭП200
Страна, годы выпуска	СССР, 1967	СССР, 1970 (1975)	Япония, нач. 1970-х	СССР, 1976	Франция, 1988– 1998	Франция, 1988– 1992	Россия, 1996
Тип привода	ИНД	ИНД	ИНД	ГР (2 оси)	ГР (2 оси)	ИНД	ИНД
$V_{max}$ , км/ч	110	110	95	110	200	300	200
Тип ЭМП	НБ-600	НБ-601	МТ-971	НБ-604	STS 105- 37-8	STS 44-39-6	НТВ-1000
Подвешива- ние ТЭД	ОП-ОС	ОП-ОС	н/д	ОП-Р	ОП-Р	ОП-Р	ОП-Р
$P_{\text{ч}}$ , кВт	1120	1010	110	1800	2800*	1300	1000
$N_{\text{ч}}$ , об./мин.	1600	1160	2280	710	н/д	н/д	1805
Тип обмот- ки статора	3 фазы	3 фазы	3 фазы	2×3 фазы	2×3 фазы, 0 вывод	3 фазы, 0 вывод	3 фазы, 0 вывод
Тип ротора	ЯП	НЯП	НЯП	НЯП	ЯП	ЯП	НЯП
Обмотки на роторе	ОВ	ОВ, ДО	ОВ, ДО, КО	ОВ, ДО	ОВ, ДО	ОВ, ДО	ОВ, ДО
2р	6	8	н/д	10	8	6	8
Масса, кг	4200	4100	н/д	7150	6400	1450	2300
Тип преобра- зователя	ПЧФ-III	ПЧФ-IV (М)	RS810	ПЧФ-V	н/д	н/д	СПУ- 5700У2
Схема	НЗПТ	НЗПТ	НЗПТ	НЗПТ	ЯЗПТ	ЯЗПТ	ЯЗПТ

Примечания. 1. Условные сокращения. Тип привода: ИНД – индивидуальный, ГР – групповой; подвешивание: ОП-ОС – опорно-осевое, ОП-Р – опорно-рамное; тип ротора: ЯП – явнополюсный, НЯП – неявнополюсный; обмотки на роторе: ОВ – обмотка возбуждения, ДО – демпферная обмотка, КО – компенсационная обмотка; схема преобразователя: НЗПТ – с неявным звеном постоянного тока, ЯЗПТ – с явным звеном постоянного тока. 2. В преобразовательной установке ЭП200 объединены выпрямительно-инверторные преобразователи, преобразователи ВТД и управляемые выпрямители возбуждения. 3.\* – указана продолжительная мощность.

ные кольца от отдельного источника (независимое возбуждение). Также на роторе всех двигателей, кроме отечественного НБ-600, расположена демпферная обмотка.

Тип фазной обмотки при индивидуальном приводе – трехфазная «звезда», при групповом – две трехфазные «звезды» со смещением на 30 электрических градусов. Фазные об-

мотки двигателей, применяемых совместно с преобразователями с ЯЗПТ, имеют нулевые выводы.

Часовые мощности тяговых двигателей, за исключением МТ-971 (110 кВт), расположены в диапазоне 1010–1300 кВт для индивидуального привода и 1800–3000 кВт – для группового.

Первый советский ЭМП НБ-600 имел явнополюсный ротор, однако в дальнейшем предпочтение было отдано неявнополюсной конструкции [1] при опорно-осевом и опорно-рамном подвешивании ТЭД. ЭМП с неявнополюсным ротором были установлены и на японской электросекции Кумоуа 791. На французском ЭПС с ВТД применены явнополюсные ЭМП с опорно-рамным подвешиванием как при индивидуальном, так и при групповом приводе.

Число полюсов двигателей отечественного ЭПС с индивидуальным приводом, как правило,  $2p = 8$  (исключение – НБ-600 с  $2p = 6$ ), а двигатели STS 44-39-6 поездов TGV Atlantique выполнены с  $2p = 6$ .

Вентиляция двигателей преимущественно аксиальная; с радиальной вентиляцией выполнены ТЭД французских электропоездов с групповым приводом.

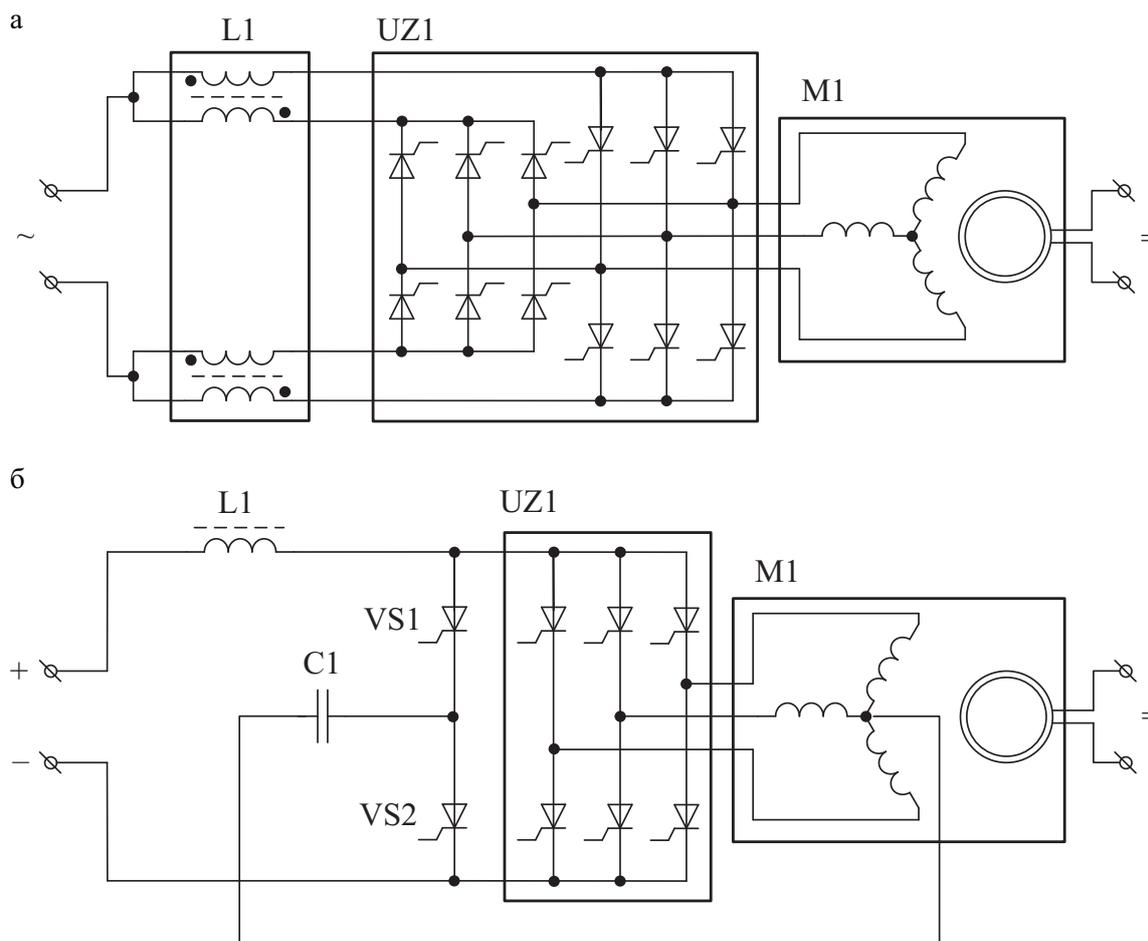
**2.2** На существующих ВТД применены преобразователи частоты и числа фаз с естественной коммутацией, выполненные по принципу инвертора тока на основе однооперационных тиристоров. Первоначально такие преобразователи (ПЧФ-III) рассматривались как коммутаторы – полупроводниковые аналоги механического коллектора, благодаря которым ВТД обладали свойствами, схожими со свойствами коллекторной машины постоянного тока [2]. В дальнейшем на преобразователи с неявным звеном постоянного тока частично были возложены функции регулирования напряжения на зажимах ЭМП (ПЧФ-IV, ПЧФ-IVM, ПЧФ-V, RS-810).

Конструктивные особенности преобразователей ВТД в основном связаны с необходимостью обеспечить коммутацию однооперационных тиристоров как в рабочих режимах за счет ЭДС вращения ЭМП, так и при пуске и малых скоростях движения, когда эта ЭДС мала.

Имеются два схемных решения преобразователей ВТД – с явным и неявным звеном постоянного тока. Принципиальные схемы преобразователей ВТД для индивидуального привода представлены на рисунке.

Преобразователь по схеме с НЗПТ был применен на советских электропоездах ВЛ80 Б, ВЛ80 В, а также на японской электросекции Кумоуа 791 (часть «а» на рисунке). Его модификация под двигатель для группового привода была установлена на электропоезде ВЛ83. Такие преобразователи непосредственно подсоединяли к выводам вторичных обмоток тяговых трансформаторов. Напряжение на зажимах ЭМП изменяли с помощью группового контроллера (ВЛ80 Б) или по принципам плавного межступенчатого регулирования (ВЛ80 В, ВЛ83). Одной из основных причин выбора такой схемы являлась относительная простота коммутации полупроводниковых приборов преобразователя при пуске и малых скоростях движения за счет напряжения контактной сети («сетевая» коммутация). Основные недостатки примененных преобразователей – наличие многообмоточного сглаживающего реактора и необходимость выполнения индивидуальных преобразователей для каждого ЭМП.

Преобразователи по схеме с ЯЗПТ применены на французском ЭПС с ВТД, а также на отечественном электропоезде ЭП200. Такие преобразователи выполняют функцию коммутатора. Напряжение на зажимах ЭМП регулируется входными преобразователями ВТД – широтно-импульсными или выпрямительно-инверторными. Преимущества такой схемы – возможность питания нескольких ВТД от одного входного преобразователя, однообмоточный сглаживающий реактор, а также возможность применения на подвижном составе переменного и постоянного тока, а также на многосистемном ЭПС. Одним из основных недостатков рассматриваемой схемы является необходимость в специальных контурах (тиристоры VS1, VS2 и конденсатор С1 на части «б» рисунка) для обеспечения искусственной коммутации тиристоров при пуске и малых скоростях движения. Однако, как правило, у устройств таких вспомогательных контуров установленная масса и мощность сравнительно невелики. Кроме того, применение искусственной коммутации повышает тяговое усилие в рабочих режимах [3, с. 132; 4].



Схемы преобразователей ВТД при индивидуальном приводе:  
 а) с НЗПТ; б) с ЯЗПТ; L1 – сглаживающий реактор; C1, VS1, VS2 – конденсатор и тиристоры устройства искусственной коммутации; UZ1 – полупроводниковый преобразователь; M1 – ЭМП

### 3 ВТД для современного отечественного ЭПС

В настоящее время существует проблема обновления парка подвижного состава отечественных железных дорог. Целесообразным можно считать создание отечественного ЭПС, в приводе которого вместо КТД применены ВТД, имеющие перед коллекторными ряд преимуществ [5, 6].

Приоритетным направлением является разработка перспективного ЭПС с бесколлекторными тяговыми двигателями. Поскольку ВТД конкурентоспособны асинхронным при мощностях выше 800–1000 кВт [7, с. 16; 8,

с. 96, 99], возможно их применение в тяговом приводе электровозов.

В сжатые сроки, с учетом опыта проектирования тягового привода электровоза ЭП200 [9] может быть создан вентильный двигатель с преобразователем по схеме инвертора тока с ЯЗПТ. Предполагаемая конструкция ЭМП ВТД – синхронная машина, на статоре которой расположена трехфазная обмотка с нулевым выводом, на роторе – обмотка возбуждения в оси  $d$  и демпферная обмотка. В преобразователе целесообразно применить искусственную коммутацию тиристоров во всем диапазоне скоростей движения.

Массовое применение вентильных двигателей в нашей стране позволит накопить достаточный опыт проектирования и эксплуатации полностью отечественных тяговых электромашинно-полупроводниковых комплексов.

## Заключение

Можно сделать следующие выводы.

ВТД с преобразователями тока разработаны преимущественно для замены коллекторных двигателей постоянного тока в тяговом приводе электровозов. Имеющиеся образцы ЭПС с ВТД имеют как индивидуальный, так и групповой привод, как опорно-осевое подвешивание ТЭД, так и опорно-рамное; охвачено большинство существующих систем тягового электроснабжения.

ЭМП ВТД преимущественно представляет собой синхронную машину нормального исполнения с фазной обмоткой на статоре и обмоткой возбуждения, размещенной на роторе в оси  $d$  и питаемой через контактные кольца, а также с демпферной обмоткой. Типы фазных обмоток, число полюсов индуктора, а также форма их выраженности отличаются в зависимости от страны-производителя, вида тягового привода, типа подвешивания ТЭД.

В существующих ВТД применяются преобразователи тока на базе однооперационных тиристоров. Два основных типа преобразователей различаются в основном принципом коммутации тиристоров при пуске и малых скоростях движения.

Возможная область применения ВТД на современном этапе на отечественных железных дорогах – электровозы с индивидуальным приводом осевой мощностью выше 1000 кВт. Наиболее быстро привод таких электровозов можно создать на основе ВТД с преобразователем тока по схеме ЯЗПТ, максимально привлекая опыт проектирования отечественного электровоза ЭП200. Производство ЭПС с ВТД позволит в перспективе освоить про-

изводство полностью отечественного ЭПС с бесколлекторными двигателями.

## Библиографический список

1. **Конструкционные** параметры вентильного тягового двигателя / А. С. Курбасов, Н. К. Иванченко, В. А. Ерманченко // Перспективный электроподвижной состав : сб. ст. / под ред. О. А. Некрасова. – М. : Транспорт, 1970. – С. 28–33. – (Тр. ЦНИИ МПС ; вып. 416).
2. **Вентильные** двигатели и их применение на электроподвижном составе / под ред. Б. Н. Тихмеева. – М. : Транспорт, 1976. – 280 с.
3. **Brun D.** Why the French chose synchronous motors // *Railway Gazette Int.* – 1985. – № 2. – P. 130–134.
4. **Исследование** искусственной коммутации тока в тяговом вентильном двигателе / В. А. Сенаторов, Н. Н. Горин, В. А. Кучумов // Повышение тягово-энергетических и эксплуатационных качеств электроподвижного состава / под ред. О. А. Некрасова. – М. : Транспорт, 1977. – С. 118–138. – (Тр. ЦНИИ МПС; вып. 576).
5. **Возможности** повышения тяговых свойств электроподвижного состава с вентильными двигателями / Г. И. Колпахчян, В. Д. Тулупов // *Электричество.* – 1976. – № 4. – С. 34–39.
6. **Сравнение** синхронного тягового двигателя с двигателями других типов / А. Барраль // *Железные дороги мира.* – 1984. – № 3. – С. 28–33.
7. **Применение** асинхронных и синхронных тяговых двигателей / И. Машфер-Тассэн, А. Гаш // *Железные дороги мира.* – 1986. – № 12. – С. 9–16.
8. **Сравнительное** исследование электровозов с бесколлекторными тяговыми двигателями, асинхронными и вентильными / В. А. Кучумов, Н. Н. Горин, В. Д. Кондрашов, В. А. Сенаторов // Параметры перспективных электровозов и вопросы электрической тяги / под ред. О. А. Некрасова. – М. : Транспорт, 1978. – С. 85–122. – (Тр. ЦНИИ МПС ; вып. 597).
9. **Тяговый** электропривод с микропроцессорной системой управления электровоза ЭП200 при применении усовершенствованных алгоритмов управления / Г. И. Колпахчян, А. В. Лебедев, Е. М. Ефимов, Е. Ю. Парнюк // *Вестн. ВЭЛНИИ.* – 2006. – Вып. 1 (50). – С. 80–90.