

# Совершенствование системы управления электропоездами

А. Я. ЯКУШЕВ, канд. техн. наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения



**Перспективным направлением совершенствования электропоездов постоянного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями является дополнение системы управления тяговыми электродвигателями с номинальным напряжением 750 В полупроводниковыми импульсными преобразователями, обеспечивающими плавное бесконтактное регулирование напряжения в режимах тяги и электрического рекуперативного торможения, снижение пусковых потерь, увеличение доли возврата энергии электрического торможения.**

Основной объем пригородных пассажирских перевозок в настоящее время выполняется электропоездами серий ЭР2Р, ЭР2Т, ЭТ2, ЭТ2М, ЭД2Т, ЭД4, ЭД4М [1]. На всех электропоездах перечисленных серий применена единая система управления тяговыми электродвигателями и преобразователями, электрооборудование состоит из однотипных аппаратов.

Электропоезда серий ЭР2Р, ЭР2Т, ЭТ2 оснащены электрооборудованием Рижского электромашиностроительного завода (РЭЗ) [2], на электропоездах серии ЭТ2М, ЭД2Т, ЭД4, ЭД4М установлено электрооборудование российских производителей [1]. Это привело к некоторым схемным и аппаратным различиям в низковольтных цепях управления, в то время как способы регулирования тяговых электродвигателей и алгоритмы управления тяго-



Рис. 1. Электропоезд ЭР22



Рис. 2. Электропоезд ЭР2Т

выми и тормозными режимами сохранены без изменений.

Принципы регулирования тяговых электродвигателей в тяговых и тормозных режимах, а также базовое электрооборудование, применяемое на электропоездах этих серий, разработаны инженерами и конструкторами РЭЗ в начале 1960-х гг. для опытных электропоездов ЭР10 и затем — для опытных и серийных электропоездов ЭР22 (рис. 1), ЭР22В [3]. Усовершенствованное электрооборудование позднее было применено на электропоездах ЭР2Р, ЭР2Т (рис. 2) и ЭТ2 [4].

В конце 1970-х гг. специалисты РЭЗ, Таллинского электротехнического завода и Рижского филиала ВНИИ вагоностроения разработали и внедрили на опытных электропоездах ЭР12 прогрессивную систему бесконтактного регулирования тяговых электродвигателей с применением тиристорных импульсных преобразователей. В дальнейшем, с учетом опыта создания и эксплуатации этих электропоездов, совместно с ВНИИ железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) был разработан технический проект перспективного электропоезда постоянного тока ЭР30 с импульсным регулированием тяговых электродвигателей [2]. Этот проект не был реализован из-за проблем с обеспечением производства импульсных преобразователей для электропоездов силовыми быстродействующими тиристорными приборами с малым временем восстановления вентиляционной прочности.

В то же время заводы РЭЗ и РВЗ (Рижский вагоностроительный завод) разработали технический проект и наладили серийный выпуск электропоездов ЭР2Р с использованием электрооборудования и системы управления, применяемых на электропоездах серии ЭР22В.

В конце 1980-х гг. было налажено производство электропоездов ЭТ2, ЭТ2М (рис. 3) в России на Торжокском машиностроительном заводе с использованием электрооборудования, выпускаемого РЭЗ и российскими производителями.

В начале 1990-х гг. Демидовский машиностроительный завод (ДМЗ) на базе электрооборудования, выпускаемого российскими производителями, организовал производство электропоездов ЭД2Т, затем ЭД4 и ЭД4М [1] (рис. 4) [4].

На электропоездах всех перечисленных серий установлены тяговые электродвигатели мощностью 225 кВт с номинальным напряжением 750 В, применен реостатный пуск с одной последовательной группировкой тяговых электродвигателей. Для расширения диапазона регулирования скорости использовано шесть ступеней ослабления возбуждения. Электропоезда оснащены электрическим рекуперативным торможением с независимым возбуждением и реостатным торможением с последовательным возбуждением тяговых электродвигателей. Возврат электрической энергии торможения в тяговую сеть обеспечивается при скорости выше 50–55 км/ч. В отсутствие или при отключении потребителя рекуперированной электроэнергии предусмотрено реостатное замещающее торможение с независимым возбуждением тяговых электродвигателей. Для снижения пусковых потерь на электропоездах всех перечисленных выше серий применены тяговые электродвигатели с низколежащей скоростной характеристикой. Скорость окончания пуска и выхода на безреостатную характеристику при номинальной уставке тока 370 А составляет 32,5 км/ч [2].

Примененные способы регулирования напряжения питания и тока возбуждения тяговых электродвигателей обеспечивают удовлетворительные энергетические показатели, но в то же время являются причиной недостаточно высоких динамических характеристик. Пусковое ускорение электропоездов реализуется на уровне 0,7 м/с<sup>2</sup> только до скорости 45–50 км/ч. Дальнейший разгон электропоезда сопряжен с глубоким ослаблением возбуждения тяговых



Фото: АЛЕКСАНДР КАМЕНСКИЙ

Рис. 3. Электропоезд ЭТ2М

электродвигателей и существенным снижением силы тяги (до 50 % от пусковой силы тяги на скорости 70 км/ч).

В режиме рекуперативного торможения отдача электроэнергии в тяговую сеть (при наличии потребителя) реализуется только до скорости 50–55 км/ч, так как максимальная величина тока возбуждения при рекуперативном торможении ограничена мощностью преобразователя собственных нужд и составляет 230 А.

Плавность перехода на реостатное торможение с последовательным возбуждением тяговых электродвигателей и предотвращение возникновения юза в этом режиме обеспечиваются постоянным ослаблением возбуждения (около 60 %). Ток возбуждения составляет 220 А при нормальной уставке блока регулятора ускорений 350 А, поэтому максимальное тормозное замедление от скорости 50–55 км/ч до 10–55 км/ч реализуется в пределах 0,6–0,65 м/с<sup>2</sup>.

При существующих графиках движения пригородных электропоездов энергетические характеристики электропоездов серий ЭР2Т, ЭТ2, ЭТ2М, ЭД2Т, ЭД4М оказались хуже по сравнению с эксплуатируемыми в тех же условия электропоездами ЭР2, не оборудованными электрическим торможением [5].

Основными причинами недостаточной эффективности энергетических характеристик являются

- увеличение пусковых потерь при одноступенчатом пуске;
- затяжной разгон электропоездов на высокой скорости движения (80–100 км/ч) при глубоком ослаблении возбуждения тяговых электродвигателей;
- малый интервал отдачи электрической энергии рекуперации при остановочном торможении (от 70 до 50 км/ч);
- отсутствие потребителя рекуперированной энергии.

АО «РЭЗ» в 1993–1995 гг. и ОАО «Силовые машины» (филиал «Электросила») при научно-технической поддержке кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПУПС) в 2002–2004 гг. для улучшения тягово-энергетических показателей электропоездов постоянного тока разрабатывали независимые проекты систем управления электропоездов с двумя перегруппировками тяговых электродвигателей в режимах тяги и рекуперативно-реостатного торможения с использованием тяговых электродвигателей на номинальное напряжение 1500 В.

На ДМЗ в 2003–2004 гг. созданы два опытных электропоезда ЭД4Э (рис. 5) с комплектом электрооборудования, разработанного и произведенного ОАО «Силовые машины» «Электросила» [6]. В этот же период Торжокский машиностроительный завод выпустил три опытных электропоезда ЭТ2ЭМ (рис. 6) [5] с комплектом электрооборудования от РЭЗ [4]. Все опытные электропоезда прошли государственные испытания и в настоящее время находятся в эксплуатации. ДМЗ наметил выпуск электропоездов с энергосберегающей системой управления, разработанной РЭЗ.

Системы управления опытных электропоездов обеспечивают снижение потерь электроэнергии за счет двухступенчатого пуска около 4–5 кВт·ч на один пуск 10-вагонного электропоезда, что составляет 5–8 % от общего расхода энергии для 4–5-километрового перегона. Расчетное увеличение возврата электроэнергии при двух группировках якорей тяговых электродвигателей составляет 6–8 кВт·ч при полном потреблении рекуперированной электроэнергии, что обеспечивает снижение на 10–15 % электрической энергии, расходуемой электропоездом при движении на одном 4–5-километровом перегоне.

За счет усовершенствования системы управления и применения тяговых

электродвигателей мощностью 235 кВт с номинальным напряжением 1500 В на электропоездах ЭД4Э реализовано ускорение 0,7 м/с<sup>2</sup> при пуске и замедление около 0,7 м/с<sup>2</sup> при скорости торможения 50–60 км/ч.

В процессе испытаний и опытной эксплуатации систем управления опытных электропоездов выявлены некоторые негативные свойства:

- при электрическом торможении с независимым возбуждением возникают существенные продольные динамические нагрузки (толчки, удары) между вагонами, обусловленные неодновременностью перегруппировки якорей тяговых электродвигателей моторных вагонов электропоезда;

- при возможном отключении потребителя рекуперированной энергии в режиме электрического торможения в момент перехода с параллельной группировки якорей тяговых электродвигателей на последовательную может возникнуть кратковременное перенапряжение в силовой цепи и на токоприемнике величиной 7–8 кВ, создаваемое суммарной электродвижущей силой (ЭДС) вращения тяговых электродвигателей на интервале времени переключения схемы на замещающее остаточное торможение;

- для предотвращения возникновения подобных перенапряжений в процессе перегруппировки якорей тяговых электродвигателей на последовательное соединение в режиме электрического торможения с независимым возбуждением требуется предварительное размыкание цепей возбуждения и задержка перегруппировки якорей на 1–1,5 с для естественного спада магнитного потока и умень-

шения ЭДС вращения тяговых электродвигателей;

- введение задержек переключения аппаратов, обусловленных особенностью алгоритмов перегруппировки тяговых электродвигателей в режиме торможения, может внести существенные погрешности при управлении системой автоведения электропоезда.

Опытные электропоезда ЭТ2ЭМ помимо указанных выше системных недостатков имеют серьезные скрытые технические недоработки, проявившиеся в процессе эксплуатации на пригородных участках Октябрьской железной дороги. Устранение перечисленных недостатков возможно при постоянной совместной работе производителей и эксплуатирующих предприятий над усовершенствованием систем управления опытных электропоездов.

Научный коллектив кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС проводит научную разработку и экспериментальные исследования систем управления для перспективных электропоездов постоянного тока в техническом содружестве с ВНИИЖТ и ОАО «Силовые машины» «Электросила» [7, 8]. По мнению коллектива кафедры, наиболее целесообразно создание электропоездов с энергосберегающей системой управления на базе выпускаемых электропоездов ЭД4М с дополнением существующего комплекта электрооборудования импульсными регуляторами на основе современных управляемых полупроводниковых приборов — силовых транзисторных модулей IGBT или двухоперационных тиристоров IGCT взамен реостатного контроллера. Такое усовершенствование позволит исключить реостатный пуск, ре-

остатное дотормаживание и сопровождающие эти процессы энергетические потери при сохранении компоновки силовой цепи с одной последовательной группировкой тяговых электродвигателей с номинальным напряжением 750 В. В этом случае практически неизменным остается алгоритм работы системы управления, схема силовой цепи и комплектация электрооборудования электропоезда ЭД4М с тяговыми электродвигателями ТЭД2У. По аналогичному принципу (с некоторыми дополнительными затратами) возможна массовая модернизация ранее выпущенных электропоездов серий ЭР2Т, ЭТ2, ЭТ2М, ЭД4М при их капитальном ремонте.

Применение полупроводниковых импульсных преобразователей обеспечивает стабилизацию тока тяговых электродвигателей в режиме пуска и при плавном регулировании возбуждения. В режиме электрического торможения при высокой скорости реализуется рекуперативное торможение с независимым возбуждением тяговых электродвигателей от преобразователя собственных нужд по существующему алгоритму управления. При снижении скорости движения в тормозном режиме и увеличении тока возбуждения тяговых электродвигателей до максимально допустимой величины режим рекуперативного торможения будет обеспечиваться посредством полупроводникового импульсного преобразователя без схемных переключений силовой цепи до скорости торможения, близкой к остановочной (3–5 км/ч).

Предлагаемое усовершенствование позволит:

- повысить плавность нарастания и стабилизацию с высокой точностью тока тяговых электродвигателей в режимах пуска и электрического рекуперативного торможения;

- реализовать более высокие, чем в эксплуатируемых электропоездах, пусковые ускорения и тормозные замедления за счет плавности регулирования тока тяговых электродвигателей и возможности повышения установок при более совершенной противоаварийной защите;

- повысить плавность движения вагонов электропоезда в тормозных режимах вследствие исключения продольных динамических нагрузок (толчков) за счет бескоммутационных плавных изменений режимов торможения;

- снизить пусковые потери и увеличить возврат рекуперированной электро-



Фото: АЛЕКСАНДР КАМЕНСКИЙ

Рис. 4. Электропоезд ЭД4М



Рис. 5. Электропоезд ЭД4Э



Рис. 6. Электропоезд ЭТ2ЭМ

энергии по сравнению с опытными электропоездами ЭД4Э и ЭТ2ЭМ за счет применения импульсного регулирования напряжения с малыми потерями;

- уменьшить токовую нагрузку тяговой сети при пуске и электрическом рекуперативном торможении, приводя-

щих к снижению потерь электроэнергии в тяговой сети;

- улучшить условия реализации и повысить точность автоматического управления тяговыми и тормозными режимами в случае применения системы автоведения электропоездов.

Таким образом, дополнение системы управления тяговыми электродвигателями с номинальным напряжением 750 В полупроводниковыми импульсными преобразователями следует признать перспективным направлением совершенствования электропоездов постоянного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями. Преобразователи обеспечивают плавное бесконтактное регулирование напряжения в режимах тяги и электрического рекуперативного торможения, снижение пусковых потерь, увеличение доли возврата энергии электрического торможения.

В режимах электрического рекуперативного торможения на высокой скорости движения целесообразно применять классическую рекуперацию, на низкой — рекуперацию с импульсным регулированием напряжения при независимом возбуждении тяговых электродвигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электропоезда постоянного тока ЭД2Т, ЭТ2М, ЭД4М, ЭР2Т, ЭТ2 // под ред. Д. В. Пегова. М.: Центр коммерческих разработок, 2008.
2. Рубчинский З. М., Соколов С. И., Эглон Е. А., Лынюк Л. С. Электропоезда. М.: Транспорт, 1983.
3. Капустин Л. Д. Электропоезда с электрическим торможением. М.: Транспорт, 1971.
4. <http://al-kamenski.livejournal.com/106107.html>
5. Мазнев А. С., Евстафьев А. М., Петров В. Б., Дементьева М. В. Энергосберегающее электрооборудование электропоездов // Локомотив. 2007. № 1.
6. Дробкин Б. З., Чернов С. С., Черяхчиев М. В., Сукач Э. И. Знакомьтесь: электропоезд ЭД4Э // Локомотив. 2002. № 7.
7. Некрасов В. И., Левитский Б. Ю., Зеленченко А. П. и др. Повышение эффективности рекуперативного тормоза электроподвижного состава с тиристорно-импульсным управлением // Электротехника. 1987. № 4.
8. Плакс А. В., Некрасов В. И., Зеленченко А. П. и др. Импульсные регуляторы с амплитудно-фазовой модуляцией для электропоездов постоянного тока // Электротехническая промышленность. Сер. Тяговое и подъемно-транспортное оборудование. М., 1984. Вып. 3 (93).

При поддержке:



exporail.ru

Организатор:

**РЕСТЭК БРУКС**

Тел.: (812) 320-80-94  
E-mail: exporail@restec.ru  
www.exporail.ru

VI Международная выставка современной продукции, новых технологий и услуг железнодорожного транспорта

**exporail2012**

**7 – 9 ноября**

ЦВК "ЭКСПОЦЕНТР", Москва

В деловой программе выставки состоится Дискуссионный клуб

[www.exporail.ru](http://www.exporail.ru)

Генеральный информационный партнер:

