

# Железнодорожная тяга и сверхпроводимость

В. Н. НОСКОВ, канд. техн. наук, директор НИЧ,

М. Ю. ПУСТОВЕТОВ, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник, Ростовский государственный университет путей сообщения



**На некоторых участках сети РЖД в периоды напряженного движения в тяге нескольких грузовых тяжеловесных поездов системе тягового электроснабжения недостает мощности. Повысить качество тягового электроснабжения железных дорог можно за счет внедрения накопителей энергии, в частности сверхпроводниковых, отличающихся надежностью в эксплуатации и высоким КПД.**

По оценке специалистов РНЦ «Курчатовский институт» и ГНЦ РФ ТРИНИТИ, для полного исключения провалов и набросов напряжения в электросети, питающей тяговую подстанцию, потребуется размещение на ней накопителя энергии (НЭ) с запасенной энергией около 5 ГДж. Подразумевается, что такой НЭ также позволит решить проблему рекуперации энергии с возвратом ее в энергосистему, питающую тяговую подстанцию. В обоих случаях полное сглаживание графика потребления электроэнергии тяговой подстанцией из энергосистемы не предполагается.

Экономический эффект от применения НЭ на тяговых подстанциях ожидается за счет:

Организация вождения тяжеловесных поездов по сети железных дорог нашей страны — одна из актуальных задач, от решения которой зависит устойчивое развитие России.

15–16 апреля 2009 г. с участием специалистов Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) была совершена опытная поездка: по маршруту Дема — Пенза проследовал тягово-энергетический вагон-лаборатория (ТЭЛ) Куйбышевской железной дороги (КЖД) со двоянным поездом весом 10442 т составностью 440 осей. Тяга осуществлялась двумя двухсекционными электровозами постоянного тока ВЛ10у, находящимися в голове состава. В числе целей эксперимента была проверка готовности системы тягового электроснабжения КЖД к тяжеловесному грузовому движению [1].

С помощью информационно-вычислительного комплекса (ИВК) ТЭЛ, разработанного в РГУПС, удалось получить осциллограммы напряжения контактной сети и скорости состава в функции пути (рис. 1).

Анализ кривых показал, что система тягового электроснабжения постоянного тока на некоторых участках недостаточно мощна для пропуска тяжеловесного состава: наблюдаются провалы напряжения контактной сети вплоть до его снятия. Напряжение исчезает на 1,1–1,7 мин, а также понижается до уровня 1,5 кВ на период до 2–3 мин (тогда как для контактной сети постоянного тока допустимо напряжение 2–4 кВ). По данным ИВК ТЭЛ, на участке Канаевка — Леонидовка мощность тяги была порядка 8,4 МВт, на участке Ключики — Евлашево — 6 МВт.

Из практики известно, что на участке между двумя тяговыми подстанциями постоянного тока (протяженностью

20–30 км) в периоды напряженного движения в тяге могут находиться до 6–7 грузовых электровозов. Принимая во внимание полученные в ходе опытной поездки данные о длительности провалов напряжения в контактной сети и мощности тяги, можно рассчитать количество энергии, требуемой для ликвидации провалов напряжения: она составляет 3,0–5,5 ГДж.

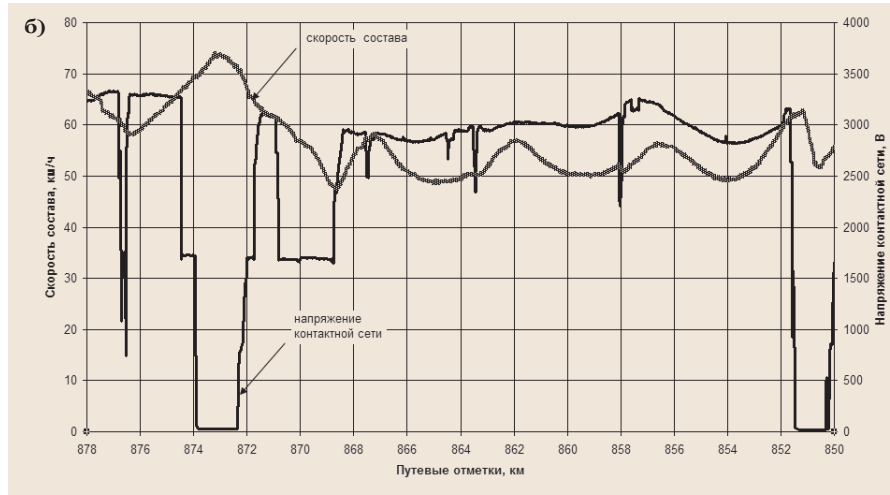
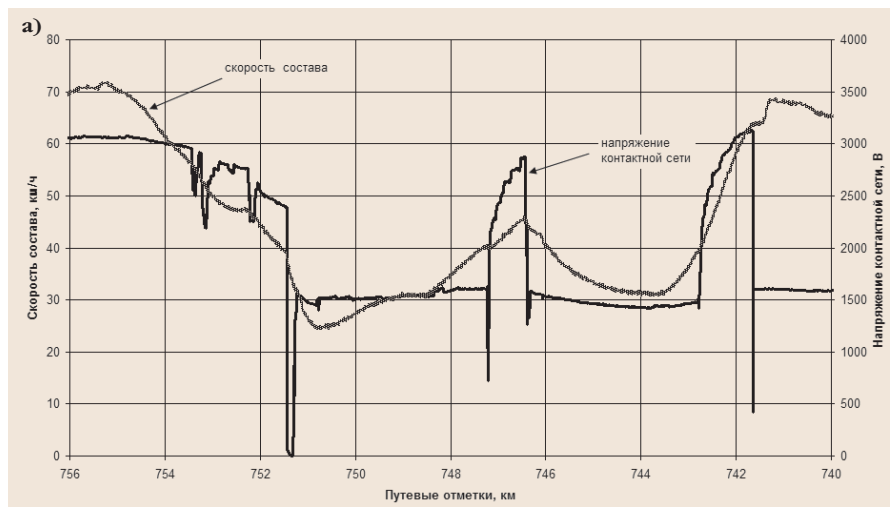


Рис. 1. Данные измерений ИВК ТЭЛ на участках Канаевка — Леонидовка (а) и Ключики — Евлашево (б)

**Сравнительные характеристики различных типов НЭ**

Критерий сопоставления	Тип накопителя энергии		
	Инерционный Эксплуатируется (Германия, Япония)	Емкостный Существует (Германия, Россия)	СПИН Эксплуатируется (США)
Оптимальная энергоемкость, МДж (кВт·ч)	до 10 <sup>3</sup> (до 280)	1–37 (0,28–10,2)	10–10 <sup>7</sup> (2,8–2,8 <sup>7</sup> )
Оптимальная мощность, МВт	до 50	до 500	> 500
КПД зарядно-разрядного цикла, %	70–92	88–90	85–99
Удельная энергоемкость, МДж/м <sup>3</sup> (кВт·ч/м <sup>3</sup> )	10 (2,8)	50 (14)	100 (28)
Удельная мощность, кВт/м <sup>3</sup>	–	до 10 <sup>5</sup>	до 60
Время работы, с	1–60	10–10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>4</sup>
Время реверса, с	0,1	0,01	0,01
Время хранения энергии, с	Ограничено (порядка 10 <sup>3</sup> ч)	Ограничено (до 100 ч)	Не ограничено
Число циклов работы	10–30 лет (10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup> )	10 <sup>2</sup> –10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup> –10 <sup>7</sup>

- уменьшения затрат на покупку электроэнергии;
- снижения ущерба от перерывов электроснабжения и некачественного электроснабжения;
- сокращения капитальных затрат на оборудование тяговой подстанции ввиду ликвидации пиков энергопотребления.

Соответственно, НЭ должен выполнять следующие функции:

- стабилизировать напряжение на нагрузке (т. е. в контактной сети);
- стабилизировать мощность (тока), потребляемую из системы внешнего электроснабжения;
- обеспечивать рекуперацию электроэнергии от электроподвижного состава через контактную сеть в НЭ.

Хотя целевой ориентир — стабилизация мощности, с точки зрения уменьшения необходимой энергоемкости НЭ более точна формулировка «обеспечение требуемого закона изменения

мощности (тока), потребляемой из системы внешнего электроснабжения». Расчеты показали, что при выполнении всех заявленных функций энергоемкость НЭ для тяговой подстанции постоянного тока должна составлять 4–20 ГДж (1,11–5,55 МВт·ч), переменного тока — 20–80 ГДж (5,55–22,22 МВт·ч) на подстанцию [2].

В таблице представлены сводные данные [3–6] об основных типах НЭ (инерционном, емкостном и сверхпроводниковом индуктивном накопителе (СПИН)), перспективных для использования в системах электроснабжения железных дорог. Емкостные НЭ и СПИН являются статическими устройствами, поэтому они выгодны с точки зрения надежности эксплуатации и высокого КПД. СПИН представляет собой сверхпроводящий магнит, в магнитном поле которого накапливается энергия.

Во второй половине 2000-х гг. РГУПС, РНЦ «Курчатовский институт» и ГНЦ

РФ «ТРИНИТИ» разработали и изготовили экспериментальный образец СПИН для систем тягового энергоснабжения с энергоемкостью 1,5 МДж (0,42 кВт·ч), рабочей силой тока до 1 0 кА при напряжении до 5 кВ [7; 8] (рис. 2). Создание устройства позволило отработать технологию изготовления СПИН оригинальной конструкции.

Конструкция на рис. 2 представляет собой один из 12 секторов «компактного тора» высотой 1100 мм и диаметром 1150 мм. Каждый сектор сформирован из 20 панелей. Их высота одинакова, а ширина уменьшается от центра сектора к периферии. Основным элементом конструкции СПИН является система сверхпроводящих электрический ток витков сложной пространственной структуры, близкой к тору, с каркасом из диэлектрических композиционных материалов на основе полимерной матрицы. За неимением специализированных полимерных материалов (их еще предстоит разработать) для панелей использовались стеклотекстолитовые пластины, в том числе фольгированные. Витки сверхпроводящего провода крепились специальным клеем по периметру на торцевую поверхность панелей. Фольга на стеклотекстолите использовалась для формирования электронагревательных элементов, которые в случае необходимости безопасно вывели бы весь СПИН в несверхпроводящее состояние без разрушения конструкции. Шаблон травления дорожек нагревательных элементов на фольгированном стеклотекстолите показан на рис. 3. Использована техно-



Рис. 2. Руководитель работ по тематике СПИН от РГУПС В. Н. Носков с экспериментальным образцом СПИН для систем тягового энергоснабжения



Рис. 3. Шаблон травления дорожек нагревательных элементов на фольгированном стеклотекстолите

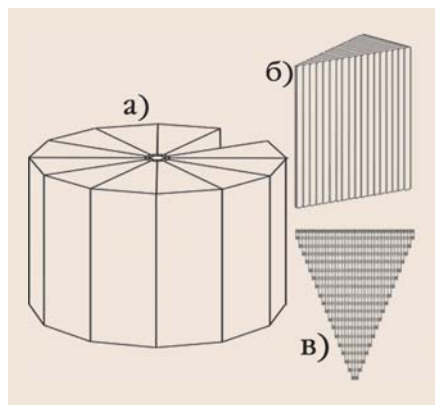


Рис. 4. Схема магнитной системы СПИН30 тороидальной конструкции с равномерным распределением энергии в объеме: а) общий вид; б) один сектор; в) сечение сектора.

логия создания печатных плат большого размера.

«Компактный тор» магнитной системы СПИН30 в сборе (рис. 4) смог бы обеспечить энергоемкость до 30 МДж. Следует отметить, что в настоящее время для работы СПИН требуются криогенные температуры и соответствующая система охлаждения (криостатирования) (на рис. 4 не показана).

Для встраивания СПИН в существующие системы электроснабжения требуются технические решения в области силовых полупроводниковых преобразователей. Вариант такого решения предложен в [9]. Принципиальная электрическая схема силового статического преобразователя постоянного напряжения показана на рис. 5. Также предлагаются разновидности подобных устройств, позволяющие индиви-

дуально управлять несколькими СПИН (либо секциями одного СПИН), что повышает адресность взаимодействия СПИН или его секции с конкретным потребителем, дает возможность более гибко влиять на качество электрической энергии, рационализировать энергообмен СПИН с элементами системы электроснабжения.

Среди основных энергосберегающих технических решений и технологий, на которые должна ориентироваться энергетика холдинга «РЖД» в энергетической стратегии до 2015 г. и на перспективу до 2030 г. (утверждена распоряжением президента ОАО «РЖД» 15 декабря 2011 г. № 2718р), названы использование накопителей энергии в основных технологических процессах; создание единой системы управления качеством электроэнергии в целях соблюдения установленных показателей ее качества и потребляемой реактивной мощности на основе использования фильтров-устройств, накопителей электроэнергии, систем контроля и управления этими показателями; достижения в области сверхпроводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носков В. Н., Пустоветов М. Ю. Перспективное использование сверхпроводниковых индуктивных накопителей (СПИН) для усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока // Тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство», Ростов-на-Дону,

окт. 2009. Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2009.

2. Носков В. Н., Пустоветов М. Ю., Чирков В. К. Об энергоемкости накопителей энергии для стационарного размещения на тяговых подстанциях // Вестник РГУПС. 2008. № 1.

3. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Тер-Газарян А. Г. Накопители энергии в электрических системах: учеб. пособие для электроэнергетич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1989.

4. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов / под ред. Д. А. Бута. М.: Энергоатомиздат, 1991.

5. Выравнивание нагрузки тяговых подстанций с помощью аккумуляторов энергии // Железные дороги мира. 1997. № 1.

6. Крутиков А. Больше мощности на рельсы // Силовая электроника. 2005. № 2.

7. Пустоветов М. Ю., Носков В. Н. О характеристиках сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН) для стационарного размещения на тяговых подстанциях // Материалы IV Междунар. симпози. «Eltrans-2007» «Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте». СПб.: ПГУПС, 2007.

8. Семенов В. И., Шакимов Л. А., Абрамова Н. Г., Лучников А. П., Клименко Е. Ю., Полулях Е. П. Моделирование и изготовление сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии из полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 3.

9. Пат. № 2370875 РФ. Преобразователь постоянного напряжения. МПК Н 02 М 3/135 / Е. Ю. Клименко, В. Н. Носков, А. Е. Полтанов, Е. П. Полулях, М. Ю. Пустоветов, В. Н. Рындин, Н. С. Флегонтов / Патентообладатель ОАО «РЖД». Заявл. 17.04.2008; опубл. 20.10.2009.

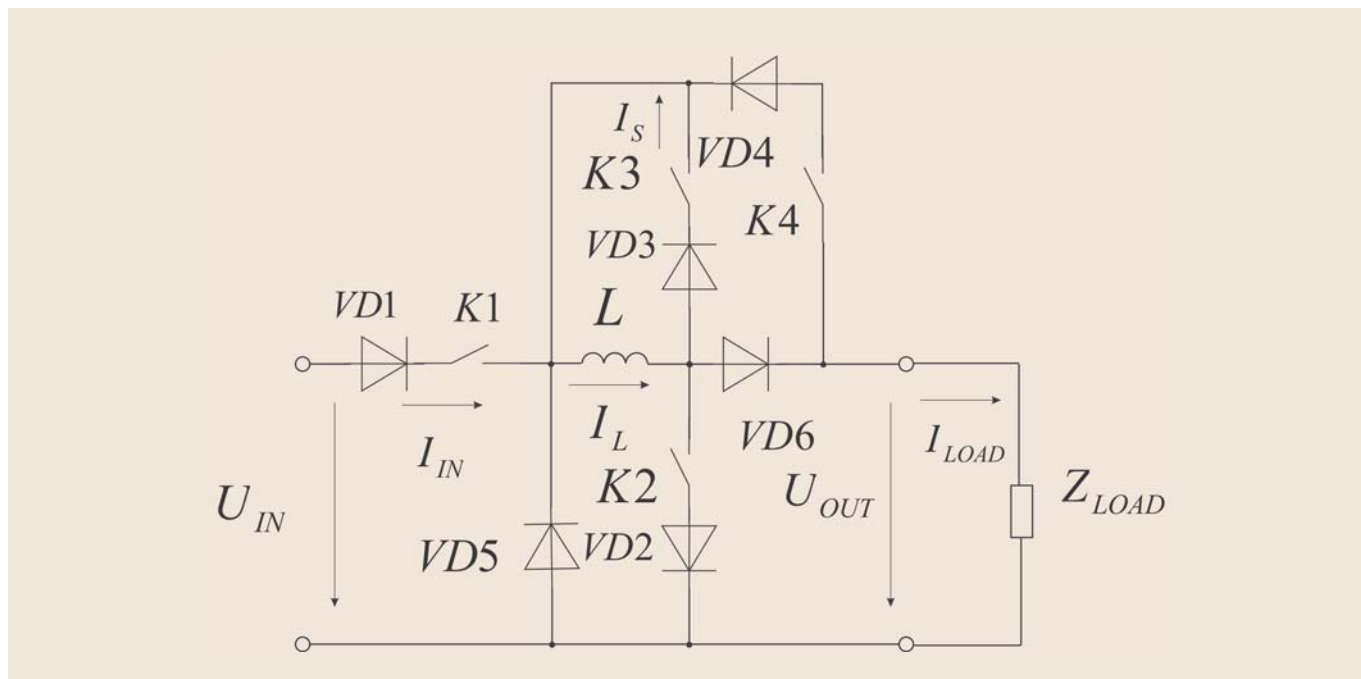


Рис. 5. Принципиальная схема силового статического преобразователя постоянного напряжения, обеспечивающего встраивание СПИН в систему электроснабжения