

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Баба, к.т.н.

Редакционный совет:
М.П. Бадер, д.т.н., профессор
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент
Л.А. Герман, д.т.н., профессор
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор
В.В. Калугин, д.т.н., доцент
А.А. Ковалев, д.т.н.
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор
А.И. Попов, д.т.н., профессор
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук

Редакция:
140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11.
Тел./факс: (495) 500-40-20
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать: 05.02.2020 г.

Отпечатано:
ГУП МО «Коломенская типография».
140400, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2а.
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60х90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 622.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Сарбаев В. И., Гармаш Ю. В., Крюков А. Н., Пономарева И. И.

Моделирование и экспериментальное исследование системы управления микроклиматом салона автотранспортного средства 2

Андреев В. В., Лобынцев В. В., Дожина Г. В., Дураков Д. Н., Куштан М. И.

Анализ энергоэффективности усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ сверхпроводниковой кабельной линией на участке с двухсторонним питанием 6

Герман Л. А., Субханвердиев К. С., Карпов И. П.

Потери электроэнергии в тяговой сети со статическим генератором реактивной мощности 11

Яковлев В. Ф.

Зарядка электромобилей в начале XX века. Часть 2 15

Ле Ван Тунг, Васильев Б. Ю., Буй Тхань Нху

Модуляционная система управления матричным преобразователем на основе прямого метода регулирования. 19

Евстафьева М. В., Изварин М. Ю.

Пути уменьшения пусковых потерь в тяговом электроприводе ЭПС постоянного тока 24

Афанасьев М. М., Клоков Д. В., Иньков Ю. М.

Применение накопителей энергии – ионисторов (суперконденсаторов) на электропоездах метрополитена 30

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Незевак В. Л., Плотников Ю. В., Шатохин А. П.

Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 1 33

Власьевский С. В., Малышева О. А., Семченко В. В.

Способы коммутации вентилей выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока с коллекторным приводом в режиме тяги 38

Брагин А. Г., Иващенко В. О., Лысов Н. В., Марков К. В.

Результаты опытной эксплуатации синхронных тяговых электродвигателей на высокоскоростном электропоезде «Сапсан» 44

Моделирование и экспериментальное исследование системы управления микроклиматом салона автотранспортного средства

// Modeling and experimental study of the microclimate control system of the vehicle interior //

Сарбаев В. И., д.т.н., профессор,
Московский политехнический университет, Москва

Гармаш Ю. В., д.т.н., профессор,
Крюков А. Н., к.т.н., доцент,
Пономарева И. И.,
РВВДКУ им. В. Ф. Маргелова, Рязань

Задача создания простого и дешевого устройства регулирования микроклимата в салоне автотранспортного средства является актуальной. Ее можно решить, регулируя скорость воздушного потока отопителя салона, которая определяется скоростью вращения ротора электродвигателя вентилятора. Статья посвящена моделированию и экспериментальному исследованию автоматического регулирования воздушных потоков в салоне автотранспортного средства.

Ключевые слова: микроклимат, климат-контроль, регулировка воздушного потока, частота вращения двигателя постоянного тока, автоматическая регулировка температуры.

The task of creating a simple and cheap climate control device in the interior of the vehicle is relevant. Such a problem can be solved by adjusting the air flow rate of the interior heater, which is determined by the speed of the rotor of the fan motor. The article is devoted to modeling and experimental study of automatic air flow control in the cabin of a vehicle.

Keywords: microclimate, climate control, airflow control frequency of rotation of a DC motor, automatic temperature control.

В последнее время появились данные о связи между температурой в салоне транспортного средства и вероятностью дорожно-транспортного происшествия, следовательно, поддержание температуры воздуха в салоне, желательное в автоматическом режиме, является актуальной задачей.

Поскольку отопителем салона управляет двигатель постоянного тока, создание системы управления температурой салона требует регулировки, желательной автоматической, частоты вращения его якоря.

Целью работы является моделирование в среде Simulink и экспериментальное исследование автоматического регулирования воздушных потоков в салоне автотранспортного средства.

Моделирование работы устройства

При моделировании с использованием Simulink [1] реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере, и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Доступ к функциям Matlab и другим его инструментам остается открытым, и их можно использовать в Simulink. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в Simulink.

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink.

Как известно из курса электротехники [2, 3], свойства двигателей постоянного тока (ДПТ) во многом определяются способами питания обмотки возбуждения, там же рассмотрены эквивалентные схемы замещения. Отметим только, что скорость вращения якоря ДПТ параллельного возбуждения определяется из соотношения

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_E \Phi}, \quad (1)$$

где n – частота вращения якоря, об/мин;

C_E – коэффициент пропорциональности, определяемый конструкцией двигателя;

U – питающее напряжение, В;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря, А;

$r_{\text{я}}$ – сопротивление якоря, Ом;

Φ – магнитный поток, Вб.

Существующие для регулирования скорости вращения якоря возможности следуют из зависимости (1), откуда видно, что регулировать частоту вращения якоря можно:

- изменением магнитного потока;
- изменением сопротивления цепи якоря;
- изменением напряжения на двигателе.

Справочные данные о ДПТ системы отопления и вентиляции и их применении на тех или иных марках

автомобилей приведены в разных изданиях [3, 4, 5, 6].

Очевидно, что применение постоянных магнитов не позволяет регулировать магнитный поток. Поэтому остаются только два способа изменения скорости вращения якоря, которые на практике сводятся к одному – в цепь якоря включают добавочные сопротивления.

При включении добавочного сопротивления происходит перераспределение напряжений, то есть напряжение на ДПТ снижается. В результате частота вращения якоря электродвигателя уменьшается, соответственно, уменьшается частота вращения вентилятора и скорость формируемого им воздушного потока.

Возможно регулирование среднего напряжения на ДПТ с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Впрочем, подобные попытки предпринимались [7], однако они не получили достаточно широкого развития в связи с отсутствием в то время мощных и надежных силовых ключей на МОП (металл-окисел-полупроводник) транзисторах.

Если период следования импульсов T остается постоянным, а длительность импульса t_u изменяется, то постоянная

составляющая U_{cp} (среднее напряжение) всей последовательности импульсов тоже будет изменяться, и это переменное U_{cp} можно использовать для питания двигателя.

ШИМ характеризуется коэффициентом заполнения (величина, обратная скважности) $\gamma = t_u/T$, где t_u – длительность импульса управления, а $T = f^{-1}$ – период повторения импульсов. Как следует из этого выражения, коэффициент заполнения изменяется в пределах 0–1. Соответственно, среднее напряжение на потребителе

$$U = U_{num} \frac{t_u}{T}, \quad (2)$$

где U_{num} – напряжение питания, В.

Применение ШИМ по такой схеме позволяет существенно снизить мощность рассеивания на регулирующем элементе схемы, особенно если в качестве такого элемента использовать мощный полевой транзистор.

На рис. 1 представлено смоделированное устройство ШИМ, реализующее данный метод.

Сигнал генератора 1 пропорционален сигналу ошибки ШИМ-регулятора и показан на рис. 2.

Этот сигнал поступает на первый вход компаратора 3, а на его второй вход поступает сигнал генератора пилообразного напряжения формирователя ШИМ-сигнала (рис. 3), который сравнивается компаратором с сигналом ошибки, и в результате сравнения формирует ШИМ-сигнал.

На рис. 4 показан выходной ШИМ-сигнал, управляющий мощным силовым ключом.

При открытом транзисторе ключа мощность рассеивания на нем невелика из-за небольшого напряжения на канале открытого транзистора (у современных МОП-транзисторов типа IRF 4905 сопротивление канала – сотые доли Ома, а максимально допустимый ток – до десятка Ампер), а при закрытом транзисторе – из-за малого протекающего через него тока (менее мкА). В случае коротких переднего и заднего фронтов импульсов (~ 10 нс) мощность, рассеиваемая при переключениях, также невелика. Отметим, что применение подобных устройств позволяет значительно уменьшить шум [8, 9], создаваемый отопителем салона автотранспортного средства, за счет плавной регулировки

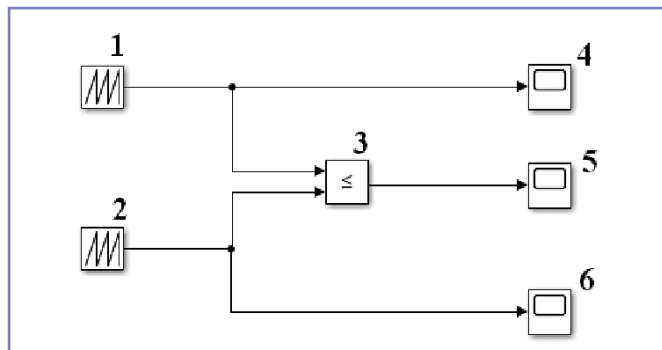


Рис. 1. Модель устройства ШИМ в среде Simulink: 1 – генератор пилообразного напряжения, напряжение которого пропорционально сигналу ошибки, 2 – генератор пилообразного напряжения ШИМ-регулятора, 3 – схема сравнения уровней (компаратор), 4, 5, 6 – осциллографы для наблюдения сигнала в различных частях устройства

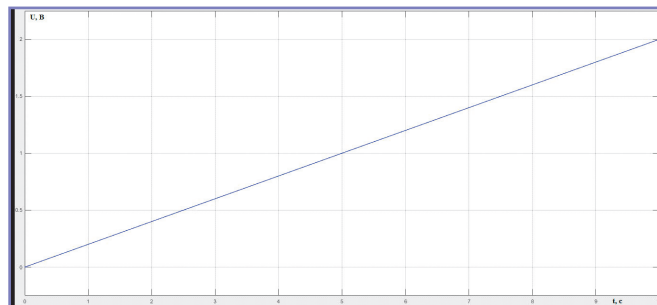


Рис. 2. Сигнал генератора

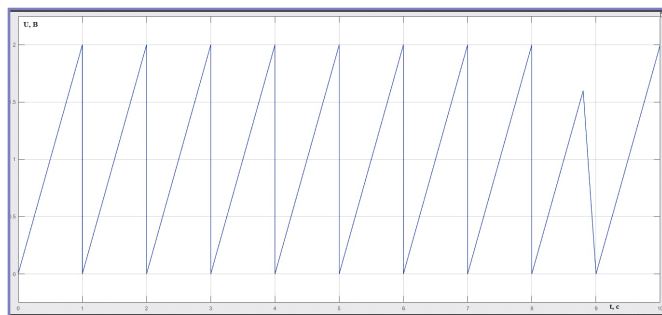


Рис. 3. Сигнал генератора пилообразного напряжения формирователя ШИМ-сигнала

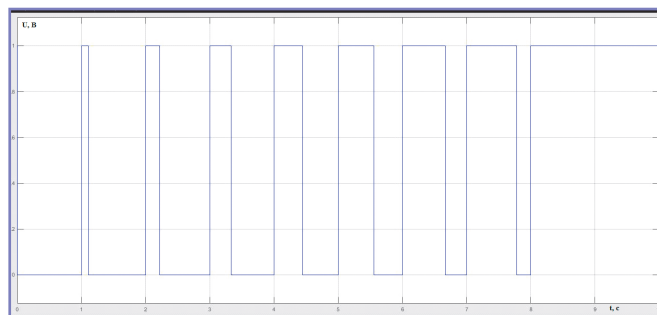


Рис. 4. ШИМ-сигнал: DA 1 – микросхема ШИМ-драйвера TL 494; DA 2 – микросхема стабилизатора напряжения 1158KP9A

скорости вращения ротора электродвигателя вентилятора.

Разработка принципиальной схемы устройства

Устройства, работающие на предложенном выше принципе, были рассмотрены нами в работах [10–13]. С целью снижения стоимости устройства, упрощения схемы и снижения мощности рассеивания на ключевом транзисторе разработан вариант схемы с р-канальным полевым транзистором IRF 4905. Электрическая принципиальная схема устройства показана на рис. 5. В нем применена микросхема 494 TL – специализированный ШИМ-драйвер, который позволяет преобразовать уровень разности входных напряжений (датчика и задатчика температуры) непосредственно в ШИМ-сигнал, управляющий р-канальным полевым транзистором IRF 4905.

Сопротивление канала полевого транзистора достаточно мало (не более 0,02 Ом), что позволяет использовать его в устройстве.

Кроме того, из устройства оказалось возможным исключить переключатель режимов работы. Режим обдува стекол может быть исключен, поскольку при установке сопротивлением R7 (задатчиком температуры) температуры, заметно превышающей реальную температуру в салоне автомобиля, скорость вращения вентилятора оказывается максимальной, и указанный выше режим обдува стекол с целью устранения конденсата реализуется автоматически.

После удаления конденсата со стекол сопротивлением R7 устанавливают желаемую температуру в салоне, которая поддерживается автоматически.

Внешний вид устройства показан на рис. 6.

Устройство изначально было разработано для отечественных легковых автомобилей Lada Vesta и X-Ray, однако оно с успехом может быть использовано и на образцах автомобильной техники, напряжение бортовой сети которых не превышает 50 В, а мощность электродвигателя отопителя – 300 Вт.

Выводы

Разработано простое устройство, позволяющее в автоматическом режиме регулировать температуру в салоне автотранспортного средства. Актуальность разработки обусловлена отсутствием на российском рынке отечественных, доступных для массового потребителя, компактных multifunctional систем поддержания заданной температуры в салоне автомобиля. Стоимость разработанного устройства невысока – около 300 рублей без учета накладных расходов. Цена поставляемых на российский рынок зарубежных аналогов при сравнимых технических характеристиках достигает 30 тыс. рублей. Применяемые в настоящее время на отечественных автомобилях системы поддержания температуры в салоне не обеспечивают автоматические режимы работы, имеют коэффициент полезного действия, не превышающий 45–50%. Последнее обстоятельство вызвано непроизводительными потерями мощности на регулировочных сопротивлениях, используемых в устройстве управления частотой вращения вентилятора электродвигателя отопительного модуля автомобиля. Управление подобной системой

осуществляется в ручном режиме, что отвлекает водителя и снижает безопасность движения.

Литература

1. Сарбаев В.И. Моделирование работы электронного устройства управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink / В.И. Сарбаев, Ю.В. Гармаш, А.Н. Крюков, Л.Г. Блиникова // Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, № 4, с. 2–5.
2. Касаткин А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Академия, 2003. – 539 с.
3. Общая электротехника / Под ред. А.Т. Блажкина. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 591 с.
4. Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей: Учебник для вузов / Ю.П. Чижков, С.В. Акимов – М.: Издательство «За рулем», 1999. – 384 с.
5. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей / В.Е. Ютт. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 440 с.
6. Данов Б.А. Электрооборудование военной автомобильной техники / Б.А. Данов. – М.: Военное издательство, 1988. – 332 с.
7. Буна Бела. Электроника на автомобиле / Бела Буна – М.: Транспорт, 1979. – 182 с.
8. Паньков Л.А. Для уменьшения шума отопителя салона легкового автомобиля / Л.А. Паньков // Автомобильная промышленность, 2006, № 3, с. 22–23.
9. Акимов С.В. Электрическое и электронное оборудование автомобилей / С.В. Акимов, Ю.И. Боровских, Ю.П. Чижков. – М.: Машиностроение, 1988. – 277 с.
10. Гармаш Ю.В. Анализ применения импульсных преобразователей напряжения в электроприводе вспомогательного оборудования автомобильной техники. Монография / Ю.В. Гармаш. – Рязань: РВАИ, 2007. – 99 с.
11. Система отопления и вентиляции салона автомобиля: Пат. 2270104 Российская федерация.

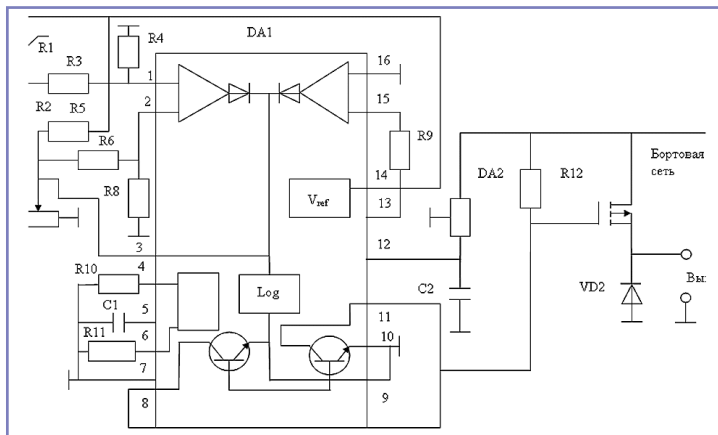


Рис. 5. Принципиальная схема автоматического регулятора частоты вращения вентилятора отопителя с ключом на р-канальном транзисторе IRF 4905



Рис. 6. Автоматический регулятор частоты вращения вентилятора отопителя

ция, МПК⁷ В 60 Н 1/04. / Карабанов С.М., Ясевич В.И., Гармаш Ю.В., Пономарева И.И. Заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «Рязанский завод металлокерамических приборов»; № 2004115012 заявл. 17.05.2004; опубл. 20.02.2006, Бюл. 8.

12. Термоэлектрический кондиционер: Пат. 2336184 Российская Федерация, МПК⁷ В60 Н 1/03 / Гармаш Ю.В.; Пономарева И.И. Заявитель и патентообладатель Рязанский военн. Авт. Ин-т.; № 2007117272; заявл. 08.05.2007; опубл. 20.10.2008, Бюл. 29.

13. Система отопления, вентиляции и кондиционирования салона автомобиля: Пат. 2472642 Российская Федерация, МПК⁷ В60 Н 1/08 / Сарбаев В.И.; Гармаш Ю.В.; Пономарева И.И. Заявитель и патентообладатель Негосударственное образовательное учреждение ВПО «Современный технический институт»; № 2011132457; заявл. 01.08.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. 2.

Сарбаев Владимир Иванович

В 1971 году окончил Ленинградский институт водного транспорта по специальности «Экономика, организация и планирование водного транспорта». Доктор технических наук, профессор. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Научные основы обеспечения экологической безопасности автомобильного транспорта». Опыт работы – 47 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Наземные транспортные средства» Московского государственного политехнического университета. Имеет более 450 научных трудов, 2 патента.

Гармаш Юрий Владимирович

Родился в 1957 году. В 1979 году окончил Рязанский государственный радиотехнический институт по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков». Доктор техни-

ческих наук, профессор. В 2017 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование систем электрооборудования автомобилей на основе адаптивных преобразователей параметров электрической энергии». В настоящее время работает профессором кафедры математических и естественнонаучных дисциплин Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища. Имеет 250 научных трудов, из них около 50 патентов.

Крюков Александр Николаевич

Родился в 1956 году. Окончил Киевское высшее военное инженерное училище связи. Кандидат технических наук, доцент. Кандидатскую диссертацию защитил по спецтеме. Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры спутниковой и тропосферной связи Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища. Имеет 40 печатных работ.

Пonomарева Ирина Ивановна

Родилась в 1967 году. В 1989 году окончила Рязанский государственный радиотехнический институт по специальности «Автоматика и управление в технических системах». Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает преподавателем кафедры математических и естественнонаучных дисциплин Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища. Имеет 5 публикаций в рецензируемых журналах, 3 патента на изобретения.

Sarbaev Vladimir

In 1971 he graduated from Leningrad Institute of Water Transportation with a degree in "Economics, structure and planning of water transportation". Doctor of engineering sciences, professor. In 2005 he defended his thesis on the

topic "Scientific basis of maintaining ecological compliance of vehicular transport". Work experience is 47 years. At present he works as a professor at the Department of terrain vehicles of Moscow State Polytechnic University. He has more than 450 scientific papers, 2 patents.

Garmash Yuriy

Was born in 1957. In 1979 he graduated from Ryazan State Radio Engineering University with a degree in "Semiconductor and non-conductor physics". Doctor of engineering sciences, professor. In 2017 he defended his thesis on the topic "Vehicle electrical systems development on basis of adaptive converters of electric power parameters". At present he works as a professor at the Department of math and natural-science majors of Ryazan Guards Higher Airborne Command School. He has 250 scientific papers, among them almost 50 patents.

Kryukov Alexander

Was born in 1956. He graduated from Kiev Military Engineering Academy of communications. Candidate of engineering sciences, associate professor. He defended his PhD thesis on the specialized topic. Work experience is 40 years. At present he works as an associate professor of the Department of satellite-based and tropospheric communication of Ryazan Guards Higher Airborne Command School. He has 40 print works.

Ponomareva Irina

Was born in 1967. In 1989 she graduated from Ryazan State Radio Engineering University with a degree in "Automatic equipment and control in engineering systems". Work experience is 28 years. At present she works as a teacher of the Department of math and natural-science majors of Ryazan Guards Higher Airborne Command School. She has 5 published works in peer-reviewed journals, 3 patents for inventions.

Анализ энергоэффективности усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ сверхпроводниковой кабельной линией на участке с двухсторонним питанием

// The analysis of energy efficiency by superconducting cable line gain of DC traction power supply system 3,3 kV on the plot with two-way power supply //

Андреев В. В., к. т. н., доцент,
Лобынцев В. В., к. т. н., Дожина Г. В.,
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва
Дураков Д. Н., Куштан М. И.,
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Увеличение трафика и возрастающие требования к уровню напряжения в контактной сети обусловили поиск эффективных технических решений по усилению системы тягового электроснабжения постоянного тока: вольтдобавочные устройства, посты секционирования и пункты параллельного соединения, усиливающие провода. Развитие техники и технологий, а также совершенствование свойств сверхпроводящих материалов и проводников на их основе, систем криогенного обеспечения открывают новую возможность усиления при помощи сверхпроводниковых кабельных линий. Такой способ усиления способен обеспечить не только повышение уровня напряжения в контактной сети на лимитирующем перегоне, но и перевести работу системы защиты от токов короткого замыкания на принципиально новый качественный уровень с существенным упрощением алгоритмов ее функционирования. В отличие от традиционных методов усиления, использование сверхпроводниковых кабельных линий дополнительно позволяет увеличить расстояние между тяговыми подстанциями. Это обстоятельство восстанавливает статус электрификации на постоянном токе.

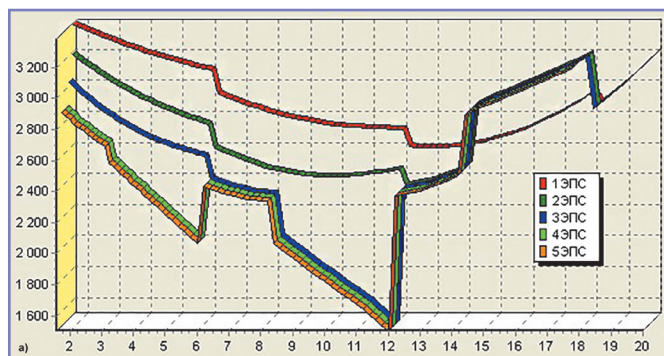
Ключевые слова: двухстороннее питание, система тягового электроснабжения, сверхпроводниковая кабельная линия (СПКЛ), межподстанционная зона, контактная сеть, электроподвижной состав, рельсовая цепь.

The increasing traffic and growing demands to voltage pressure in the catenary system has led to the search of effective technical solutions for the strengthening of DC traction power supply system, which includes: volts adding devices, partitioning and parallel connection points, reinforcing wires. The development of engineering technologies, the improvements of superconducting materials and its conductors characteristics, cryogenic supply systems development open up the possibility for strengthening with superconducting cable line. This strengthening technology is able to provide the increase of voltage pressure level at the catenary system on limiting stretch and to increase the operation of the short circuit currents protection system to the fundamentally new level with significant simplification of its functional algorithms. Unlike traditional strengthening technologies the usage of superconducting cable lines additionally allows to increase the distance between traction power substations. This circumstance restores the status of DC current electrification.
Keywords: two-way power supply, traction power supply system, superconducting cable line, inter-substation zone, catenary, electric rolling stock, track circuit.

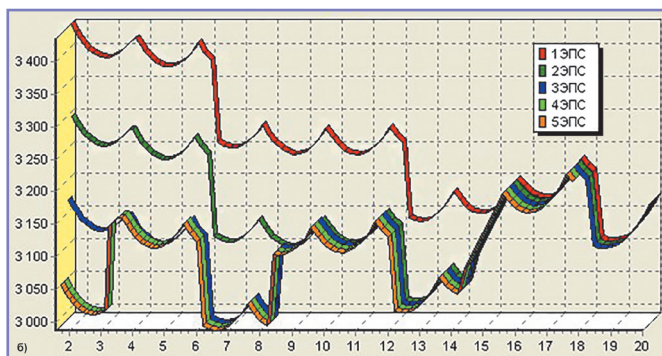
Основной целью проводимых инженерных расчетов является оценка вклада в пропускную способность и повышение энергоэффективности участка железной дороги при различных вариантах усиления контактной сети. Для проведения исследований использовался программный комплекс, разработанный на кафедре «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ) [1].

Для оценки минимального уровня напряжения в контактной сети рассмотрен двухпутный участок постоянного тока с двухсторонним питанием, контактной подвеской типа М-120+2МФ-100 и длиной межподстанционной зоны 22,5 км при фиксированном значении потребляемого электроподвижным составом тока $I = 1500$ А, минимальном межпоездном интервале 8 мин и средней скорости движения по участку 45 км/ч. Полученные в ходе расчета изменения уровня напряжения на токоприемниках представлены (рис. 1) для пяти из шести единиц подвижного состава, постепенно заполняющего межподстанционную зону с последующим выходом на стационарный режим движения по рассматриваемому участку. Уровень напряжения в контактной сети в данном случае определяется токовой нагрузкой, создаваемой пятью электропоездами, одновременно находящимися на рассматриваемом участке. Бросковый характер изменения напряжения, прежде всего, обусловлен входом и выходом электропоездов с рассматриваемой межподстанционной зоны, отделенной от смежных участков изолирующими сопряжениями.

В целях сопоставления характера и уровней изменения напряжения на токоприемниках ЭПС, встречно движущихся по обоим путям рассматриваемого участка, выполнены расчеты для вариантов без усиления контактной подвески и усиленной СПКЛ с интервалом присоединения



а)



б)

Рис. 1. Зависимости изменения уровня напряжения на токоприемниках ЭПС от их числа и координаты нахождения на участке: без усиления контактной сети (а) и с усиленной СПКЛ контактной сетью с интервалом присоединения 2 км (б)

0,4 км (рис. 2). В отсутствие усиления наблюдается недопустимо низкий уровень напряжения на токоприемнике ЭПС, составляющий 1689 В, который с применением СПКЛ увеличивается до 3029 В, приближаясь к номинальному.

Анализ минимальных значений уровня напряжения в контактной сети,

полученных в ходе предварительных расчетов, показал, что использование СПКЛ в качестве одного из вариантов усиления контактной подвески, даже без шунтирования рельсовой цепи, при заданных параметрах движения позволяет поднять уровень напряжения в контактной сети до 2988 В (рис. 1а) и 3039 В (рис. 2), что,

в свою очередь, открывает возможность значительного увеличения длины межподстанционной зоны. В этой связи последующие расчеты проведены для участка с двухсторонним питанием длиной 45 км.

В расчете были приняты следующие исходные данные: вероятностный график движения грузовых поездов расчетного (Q_r) и удвоенного ($2Q_r$) веса; минимальный межпоездный интервал 8 мин; максимальное число пар поездов $N_0 = 30$; варианты размеров движения: $0,9N_0$, $\frac{2}{3}N_0$, $\frac{1}{2}N_0$, $\frac{1}{4}N_0$; варианты усиления контактной подвески М-120 + 2МФ-100: без усиления (б/у), пост секционирования (ПС), два усиливающих провода типа А-185 (2А-185), пост секционирования совместно с двумя усиливающими проводами (ПС + 2А-185), сверхпроводниковая кабельная линия с интервалом присоединения к контактной сети 0,4 км (СПКЛ).

В ходе расчета построены графики изменения напряжения на токоприемниках электроподвижного состава (рис. 3) и потребляемого им тока (рис. 4) в зависимости от координаты местоположения

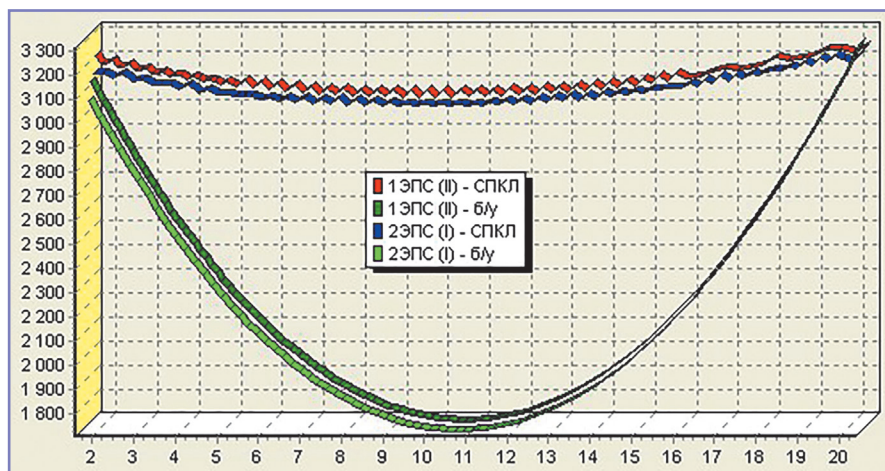
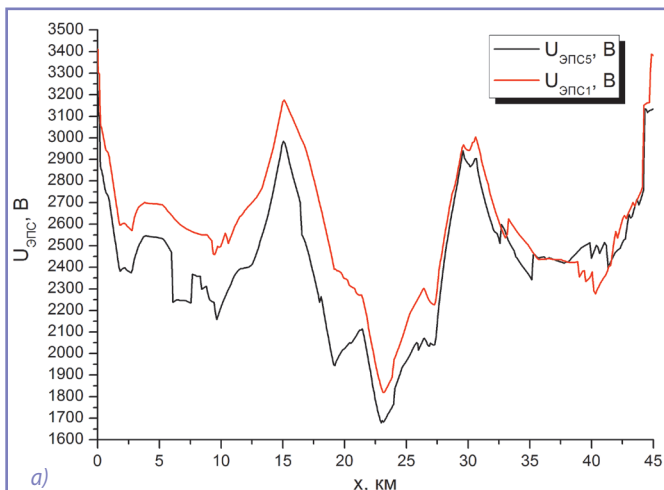
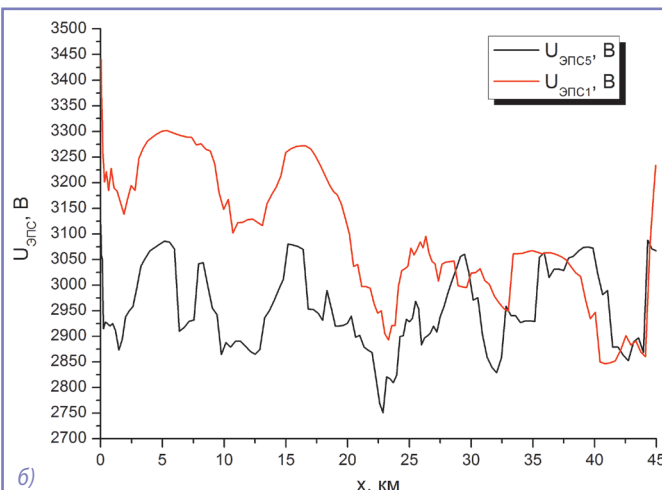


Рис. 2. Зависимости изменения уровня напряжения на токоприемнике ЭПС движущегося по четному (II) и нечетному (I) путям участка без усиления (б/у) и усиленного СПКЛ с интервалом присоединения к контактной подвеске 0,4 км



а)



б)

Рис. 3. Графики изменения напряжения на токоприемниках ЭПС при размерах движения поездов $0,9N_0$ и удвоенной массе составов: без усиления (б/у) (а), с СПКЛ (б)

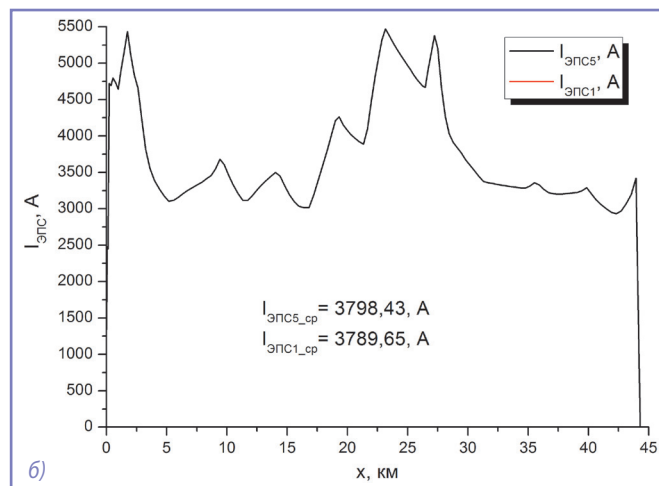
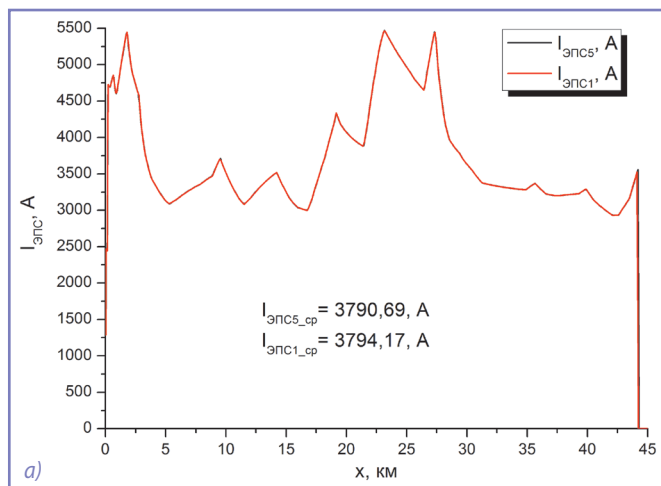


Рис. 4. Графики потребляемого ЭПС тока при размерах движения поездов $0,9N_0$ и удвоенной массе составов: без усиления (б/у) (а), с СПКЛ (б)

при движении по обоим, нечетному (I) и четному (II), путям рассматриваемого участка во встречном направлении. Для сравнения выбраны первый (№ 1) и пятый (№ 5) поезда, которые при изменении поездной нагрузки всегда остаются в границах межподстанционной зоны. Данные относительно указанных поездов приведены в таблице 1.

Представленные на рис. 3 графики изменения уровня напряжения на токоприемниках ЭПС рассчитаны исходя из условия идентичности режимов ведения поездов по обоим путям рассматриваемого участка. В этой связи среднее значение токов потребляемых ЭПС (рис. 4) имеет отличие лишь на несколько ампер. Аналогичные условия положены в основу определения минимального уровня напряжения в контактной сети рассматриваемого участка при движении составов удвоенной массы (рис. 5).

Для оценки эффективности каждого из вариантов усиления в одних координатах построены гистограммы потерь энергии в тяговой сети рассматриваемого участка при движении поездов удвоенной массы (рис. 6).

Гистограммы на рис. 6 наглядно иллюстрируют вклад каждого из вариантов усиления контактной сети по снижению потерь электрической энергии относительно базового варианта М-120 + 2МФ-100. Несмотря на всю привлекательность использования варианта усиления СПКЛ, важным аспектом является корректный учет затрат энергии на поддержание сверхпроводящего состояния, связанный с теплопритоком и тепловыделениями внутри криогенного объема кабельной линии, затраты на компенсацию которых могут составлять до 0,4% от объема передаваемой (проходной) мощности при эквивалентной длине

петли 5 км. В этой связи немаловажным фактором является трассировка кабельных трасс на перегоне и объединение их в систему циркуляционного охлаждения таким образом, чтобы отказ отдельных ее элементов не приводил к отказу системы в целом.

В общем случае система циркуляционного охлаждения может быть образована криостатом СПКЛ с расположенной внутри него на полом формере однополюсной токоведущей частью. Коаксиально расположенная в центре токоведущая часть будет выступать для жидкого азота в качестве напорного тракта, а криостат – в качестве обратной трубы. Таким образом, проложенные вдоль каждого пути однополюсные СПКЛ могут обеспечить ток жидкого азота в обе стороны при условии совмещения криогенных станций с токовыми вводами через каждые 2,4 км.

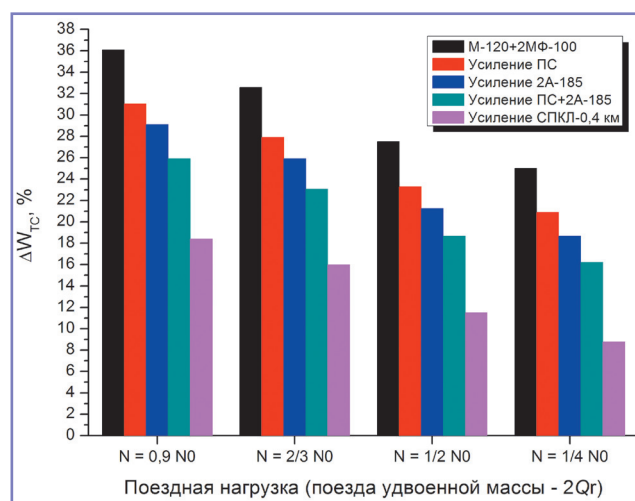
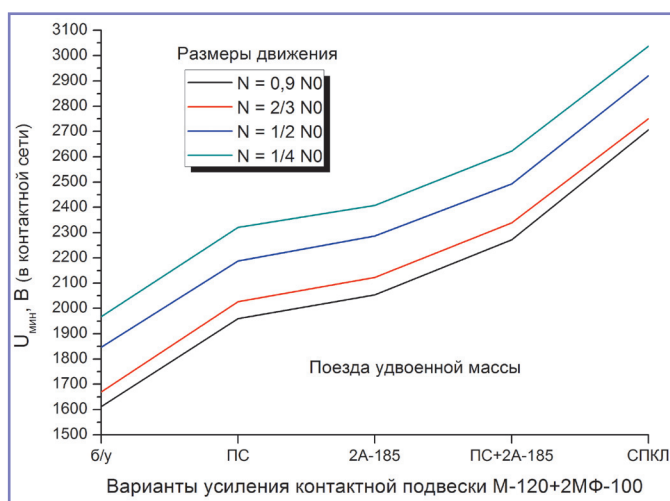


Рис. 5. Минимальный уровень напряжения в контактной сети при различных вариантах ее усиления

Рис. 6. Потери энергии в тяговой сети рассматриваемого участка в % от расхода электрической энергии на тягу поездов при различных вариантах усиления

Таблица 1. Минимальный уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и потребляемое значение тока, потери энергии в тяговой сети

Поездная нагрузка	Масса	Тип усиления	Нечетный путь (I)				Четный путь (II)				$dW_{TC}, \%$
			$U_{ЭПСmin}, В$	$I_{ЭПС}, А$	$x, км$	$t, мин$	$U_{ЭПСmin}, В$	$I_{ЭПС}, А$	$x, км$	$t, мин$	
$N = 0,9 N_0$	Qr	б/у	2599	2691	22,96	56,80	2685	2677	22,92	20,60	16,73618
		СПКЛ	3136	2661	22,87	56,70	3235	2609	22,73	20,40	8,574359
	2Qr	б/у	1682	5470	23,15	57,00	1820	5463	23,11	20,80	36,0894
		ПС	2017	5310	23,70	57,60	2158	5323	23,70	21,40	31,03339
		2А-185	2112	5382	22,96	56,80	2280	5354	22,91	20,60	29,08709
		ПС + 2А-185	2328	5382	22,96	56,80	2506	5354	22,91	20,60	25,89847
$N = \frac{2}{3} N_0$	Qr	б/у	2653	2735	23,15	65,30	2712	2731	23,11	20,80	15,2743
		СПКЛ	3212	2603	24,06	66,30	3241	2597	24,11	21,90	7,524721
	2Qr	б/у	1785	5470	23,15	65,30	1903	5463	23,11	20,80	32,56804
		ПС	2111	5364	23,52	65,70	2242	5377	23,48	21,20	27,88595
		2А-185	2242	5392	23,43	65,60	2355	5405	23,38	21,10	25,91889
		ПС + 2А-185	2423	5364	23,52	65,70	2546	5377	23,48	21,20	23,06421
$N = \frac{1}{2} N_0$	Qr	б/у	2685	2736	90,20	23,14	2766	2731	23,11	20,80	13,15421
		СПКЛ	3220	2725	90,30	23,24	3329	2716	23,29	21,00	5,519715
	2Qr	б/у	1851	5471	90,20	23,14	2012	5463	23,10	20,80	27,53297
		ПС	2307	5170	89,70	22,67	2451	5219	22,73	20,40	23,28493
		2А-185	2287	5471	90,20	23,14	2460	5463	23,11	20,80	21,23391
		ПС + 2А-185	2493	5450	90,30	23,24	2664	5432	23,29	21,00	18,67154
$N = \frac{1}{4} N_0$	Qr	б/у	2770	2736	23,12	164,9	2771	2731	23,10	20,80	12,08642
		СПКЛ	3218	2691	23,22	165,0	3359	2467	22,44	20,10	4,246683
	2Qr	б/у	2098	5151	22,65	164,4	2080	5219	22,73	20,40	24,99791
		ПС	2361	5400	23,40	165,2	2361	5405	23,39	21,10	20,8792
		2А-185	2471	5472	23,12	164,9	2472	5463	23,11	20,90	18,66111
		ПС + 2А-185	2675	5456	23,22	165,0	2675	5461	23,20	20,90	16,19926
		СПКЛ	3169	4622	2,690	148,2	3128	5461	23,20	20,90	8,759225

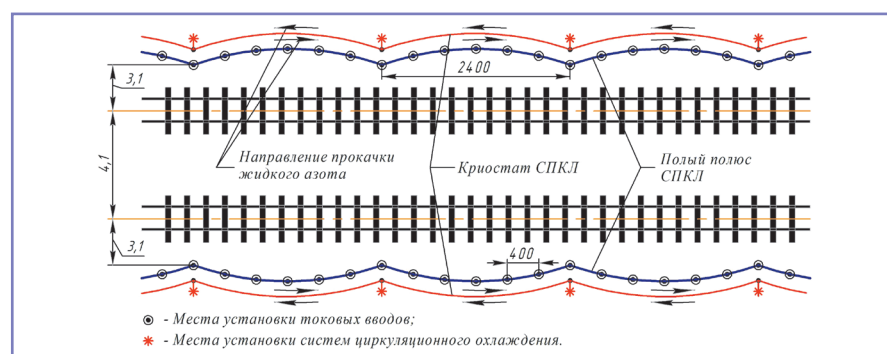


Рис. 7. Однополюсные СПКЛ в составе системы циркуляционного охлаждения

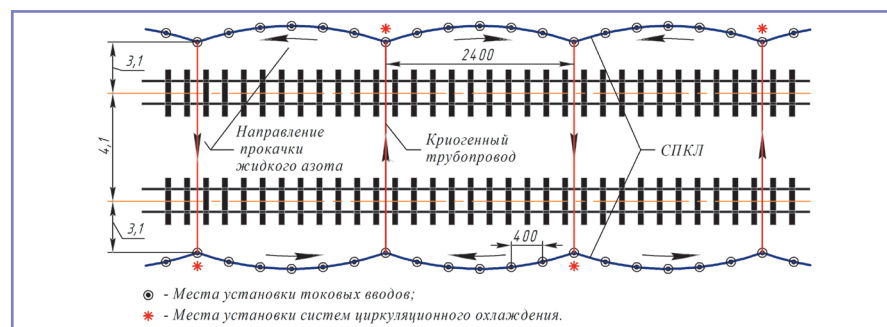


Рис. 8. Система циркуляционного охлаждения, образованная с использованием однополюсных СПКЛ и соединительных криогенных трубопроводов

Оптимизация схемы по рис. 7 позволяет вдвое сократить количество криогенных станций за счет использования криогенных соединительных трубопроводов под основанием пути и изменения топологии системы циркуляционного охлаждения (рис. 8). В данном случае повреждение одного участка не означает выхода из строя всей системы, так как она организована отдельными контурами, в криостатах которых могут быть использованы более простые в изготовлении сверхпроводниковые токоведущие части на полнотелом формере.

В ходе выполнения расчетов были рассмотрены различные варианты усиления участка системы тягового электроснабжения постоянного тока, однако, несмотря на достигнутые эффекты, открытым остается вопрос, какой будет технически обоснованная длина интервала присоединения СПКЛ к контактной сети. При ответе на этот вопрос необходимо руководствоваться не только перечисленными выше нюансами, касающимися конструктивных особенностей СПКЛ и систем их

циркуляционного охлаждения, но и достигаемым уровнем напряжения на токоприемнике ЭПС при их использовании.

Выводы

Проведенное исследование показало значительное превосходство СПКЛ над остальными вариантами усиления контактной сети рассмотренного участка. Еще на этапе предварительных расчетов было отмечено, что увеличение расстояний между соседними точками присоединения влечет за собой потерю эффекта от реализованной в чистом виде системы распределенного питания [2], поэтому при проведении дальнейших расчетов интервал присоединения СПКЛ к контактной сети был принят равным 0,4 км.

Гистограммы потерь мощности в тяговой сети, построенные для варианта усиления контактной сети СПКЛ, фактически отражают уровень потерь мощности в рельсовой цепи. В этой связи борьба с потерями и снижением уровня напряжения в контактной сети должна иметь комплексный характер, в том числе охватывая рельсовую цепь. Вместе с тем рассмотренные технические решения позволили обнажить перспективу развития систем тягового электроснабжения постоянного тока, которая с повышением критической температуры сверхпроводниковых материалов обретет новый смысл и значимость.

Литература

1. Балакина Е.П., Баранов Л.А., Гречишников В.Е., Шевлюгин М.В. и др. Комплекс программ для расчета системы электроснабжения при работе подвижного состава с рекуперацией. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011610650, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.
2. Лобынцев В.В., Пупынин В.Н. Система тягового электроснабжения постоянного тока с использованием сверхпроводящего кабеля // «Электричество», № 2, 2007.

Андреев Валерий Васильевич

Родился в 1940 году. В 1966 году окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук. В 1973 году защитил диссертацию по

теме «Исследование режимов работы системы энергоснабжения электрических железных дорог постоянного тока с тяговой сетью трехфазно-постоянного тока». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет более 50 научных трудов, 1 учебник в соавторстве, 1 учебное пособие, 1 патент на полезную модель, 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Лобынцев Владимир Васильевич

Родился в 1980 году. В 2003 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Сверхпроводниковые ограничители токов короткого замыкания для систем тягового электроснабжения». Опыт работы – более 20 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет 40 научных публикаций, 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Дожина Галина Владимировна

Родилась в 1974 году. В 1996 году окончила Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Опыт работы – 23 года. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет 8 научных публикаций.

Дураков Дмитрий Николаевич

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает инженером-исследователем в НИЦ «Курчатовский институт». Имеет 6 научных публикаций.

Куштан Максимилиан Игоревич

Родился в 1993 году. Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает механиком экспериментальных стендов НИЦ «Курчатовский институт» и является студентом РУТ (МИИТ). Имеет 1 научную публикацию.

Андреев Valeriy

Was born in 1940. In 1966 he graduated from the Moscow Institute of Railway Transport Engineers (MIIT) with a degree in "Electrification of railway transport". Candidate of technical sciences. In 1973 he defended his thesis on the topic "Study of the operating modes of the power supply system of electric railways of constant current with a three-phase direct current traction network". Work experience is more than 50 years. At present he is an assistant professor at the Department of electric power of transport RUT (MIIT). He has more than 50 scientific papers, 1 co-authored textbook, 1 study guide, 1 utility model patent, 4 certificates of registration of a computer program.

Lobyntsev Vladimir

He was born in 1980. In 2003 he graduated from the Moscow State University of Transport (MIIT) majoring in "Electrical power supply of electric railways". He is Candidate of technical sciences. In 2009 he defended his thesis on "Superconductive fault current limiters for traction energy systems". He has more than 20 years of work experience. At present he works as associate professor in Electric power of transport department at Russian University of Transport (MIIT). He has 40 scientific publications, 2 patents for invention, 1 certificate of registration for software application.

Dozhina Galina

She was born in 1974. In 1996 she graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in "Power supply of electrical railway roads". Her working experience is 23 years. At present she works as senior teacher in Electric power of transport department at Russian University of Transport (MIIT). She has 8 scientific publications.

Durakov Dmitry

He was born in 1989. In 2012 he graduated from the Moscow State University of Transport (MIIT) majoring in "Electrical power supply of electric railways". He has 7 years of work experience. At present he works as research engineer at the National research center "Kurchatov Institute". He has 6 scientific publications.

Kushtan Maksimilian

Was born in 1993. Has 3 years of working experience. At present he is a mechanic of experimental stands of NRC "Kurchatov Institute" and a student at Russian University of Transport (MIIT). He has 1 scientific publication.

Потери электроэнергии в тяговой сети со статическим генератором реактивной мощности

// Electric energy losses in a traction power network with a static var generator //

Герман Л. А., д.т.н., профессор,
Филиал СамГУПС, Нижний Новгород

Субханвердиев К. С., к.т.н.,
«Трансэлектропроект» – филиал ОАО «Росжелдорпроект», Москва

Карпов И. П.,
Горьковская дирекция по энергообеспечению
«Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД», Нижний Новгород

В работе предложен эффективный способ регулирования мощности статическими генераторами реактивной мощности, устанавливаемыми на постах секционирования контактной сети, позволяющий контролировать ток тяговой нагрузки по соотношению его гармонических составляющих. Дан алгоритм определения тока компенсации для полной компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки, относящейся к посту секционирования. Приведен пример практической реализации управления СГРМ на посту секционирования.

Ключевые слова: регулирование мощности, потери электроэнергии, генератор реактивной мощности, контактная сеть, пост секционирования, гармонические составляющие тока.

The paper suggests an efficient method of power control with static VAR generators installed on overhead line feeder pillars, which enables to control the traction load current based on the ratio of its harmonics. An algorithm is given for determination of compensation current for total compensation of reactive power of traction load related to a feeder pillar. An example is presented of practical implementation of control of static VAR generator on a feeder pillar.

Keywords: power control, electric energy losses, static VAR generator, overhead line, feeder pillar, current harmonics.

демонстрирует осциллограмма, зафиксированная на ПС Оричи Горьковской дороги (рис. 2). До момента 13 ч 36 мин 53 сек СГРМ был отключен, и напряжение изменялось в пределах 26,2–28,4 кВ. При включении СГРМ напряжение стабилизировалось.

Однако контроль тяговой нагрузки для регулирования мощности СГРМ происходит косвенно – по уровню напряжения на шинах ПС, поэтому не всегда происходит полная компенсация реактивной нагрузки, а зачастую наблюдается и режим перекомпенсации нагрузки, отнесенной к ПС. Это приводит к повышенным значениям потерь мощности в тяговой сети [3]. В связи с указанным предлагается контролировать ток тяговой нагрузки путем контроля гармонических составляющих напряжения на шинах ПС с последующим расчетом гармонических составляющих тока. Тогда закон регулирования мощности СГРМ можно выполнить по изобретению [2], где по третьей гармонике тока нагрузки определяется компенсируемый ток первой гармоники СГРМ. Действительно, большая часть электровозов в грузовом

Внедрение статических регуляторов реактивной мощности (СГРМ) на постах секционирования (ПС) тяговой сети переменного тока кардинально решает проблемы пропускной способности железных дорог. При этом по опыту Западно-Сибирской, Северной и Горьковской дорог увеличивается число тяжеловесных и двоярных поездов в сутки на 10–25 составов и поддерживаются нормативные значения напряжения. Как пример покажем рисунок повышения уровня напряжения на ПС с СГРМ (рис. 1), представленный в диссертационной работе [1]. Как видно, СГРМ повышает напряжение с 22–24 до 24–25 кВ и при этом ограничивает повышенные значения напряжения до 27,3–27,5 кВ.

Эффективность стабилизации напряжения в тяговой сети с помощью СГРМ

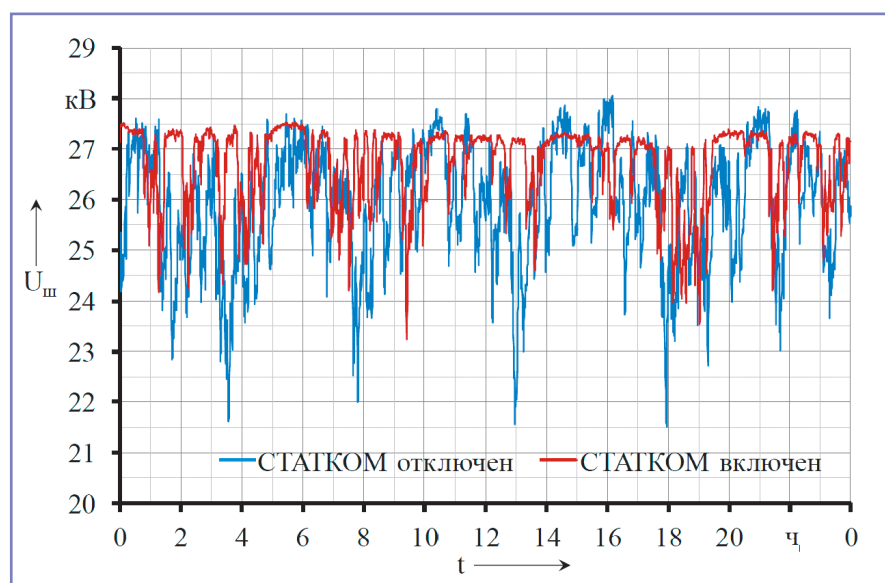


Рис. 1. Напряжение на посту секционирования с включенным и отключенным СГРМ

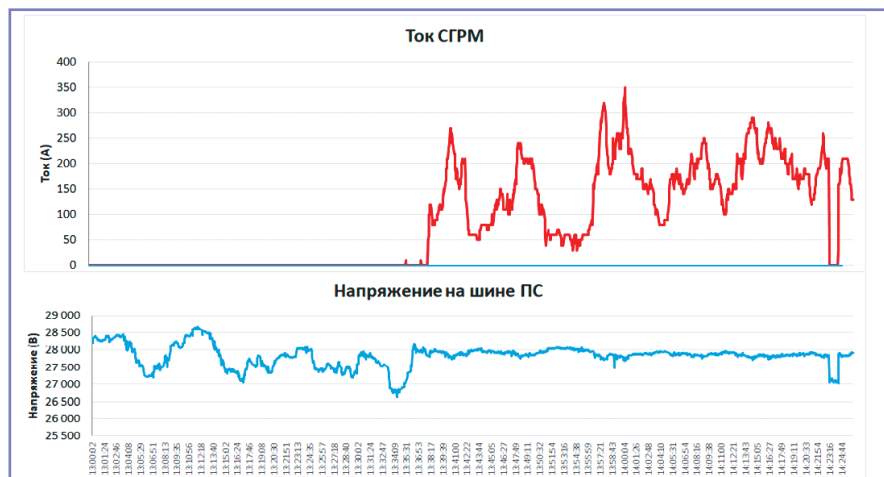


Рис. 2. Ток СГРМ и напряжение поста секционирования

движении на отечественных железных дорогах работает с выпрямительными установками и отличается наличием гармоник 3, 5, 7 и т.д. [4]. В частности, самая большая третья гармоника тока составляет 20–25% от основной [4, 5, 6]. Следует отметить: несмотря на то, что появились электровозы с асинхронными двигателями, на отечественных железных дорогах еще много десятилетий в грузовом движении будут обращаться выпрямительные электровозы с коллекторными двигателями.

В изобретении [2] рассматривались конденсаторные установки поперечной емкостной компенсации, включенные фильтром на гармонику 150 Гц, и поэтому эта гармоника тяговой нагрузки замыкалась на практически нулевое значение фильтра КУ, а напряжение гармоники 150 Гц на шинах ПС было равно нулю. Вот почему контролировать ток третьей гармоники в КУ было достаточно просто. Однако в предлагаемой статье рассматривается СГРМ на ПС с активными фильтрами на третью и другие гармоники, значения которых изменяются в зависимости от управления СГРМ. Поэтому в данном случае контроль за гармониками тока тяговой нагрузки на ПС следует выполнять по-другому, то есть не так, как в [2].

Итак, возможны следующие режимы работы СГРМ:

- регулирование мощности с целью максимального снижения потерь мощности в тяговой сети;
- регулирование мощности с целью повышения пропускной способности;
- регулирование мощности с целью повышения пропускной способности с одновременным снижением потерь мощности в тяговой сети.

Кроме того, как указывалось, СГРМ способен активным фильтром снижать

уровень гармоник, поэтому следует в вышеуказанных режимах учитывать наличие активных фильтров СГРМ.

В статье ограничимся рассмотрением наиболее сложной задачи регулирования мощности СГРМ с целью максимального снижения потерь мощности в тяговой сети. В дальнейшем закон регулирования СГРМ должен быть дополнен совместным рассмотрением задач снижения потерь мощности с повышением пропускной способности межподстанционных зон тяговой сети.

Схема подключения СГРМ

На рис. 3 представлен пост секционирования с СГРМ, подключенный к тяговой сети, питающейся от двух тяговых подстанций 1 и 2 [3]. Введены следующие обозначения:

1 и 2 – левая и правая тяговые подстанции рассматриваемой межподстанционной зоны соответственно;

3 – тяговая сеть;

4 и 5 – тяговые нагрузки правого и левого участков рассматриваемой зоны относительно поста секционирования (ПС);

6 – шины ПС;

7 – фиктивная нагрузка ПС, полученная разнесением тяговой нагрузки между подстанциями и ПС;

8 – измерительный трансформатор напряжения на ПС;

9 – устройство СГРМ;

10 – разъединитель в цепи устройства СГРМ;

11 – вакуумный выключатель в цепи устройства СГРМ;

12 – измерительный трансформатор тока в цепи устройства СГРМ;

13 – вакуумный выключатель, шунтированный резистором 13 в цепи устройства СГРМ;

14 – токоограничивающий резистор заряда;

15 – вводной реактор в цепи устройства СГРМ;

16 – блок силовых ячеек в цепи устройства СГРМ;

17 – выходной реактор в цепи устройства СГРМ;

18 – шкаф управления устройством СГРМ;

19 – расчетный блок.

В шкаф управления устройством СГРМ 18, связанный с расчетным устройством 19, заведены токовые цепи от трансформатора тока ТА 12 и цепи напряжения от трансформатора напряжения сети ТВ 8.

Расчеты начинаются с определения тяговых нагрузок межподстанционной зоны, относящихся к посту секционирования, – тока 7 (рис. 3). Для этого все нагрузки тяговой сети распределяются между подстанциями и постом секционирования, представляющим так называемую фиктивную подстанцию [7]. На ПС трансформатор напряжения измеряет напряжение, которое формируется как разность напряжения холостого хода ПС и потерь напряжения от первой и остальных гармоник токов электровозов:

$$U_C = U_{CXX} - (\sum_{i=1}^n \Delta U_{(1)i} + \sum_{j,i=1}^{m,n} \Delta U_{(j)i}), \quad (1)$$

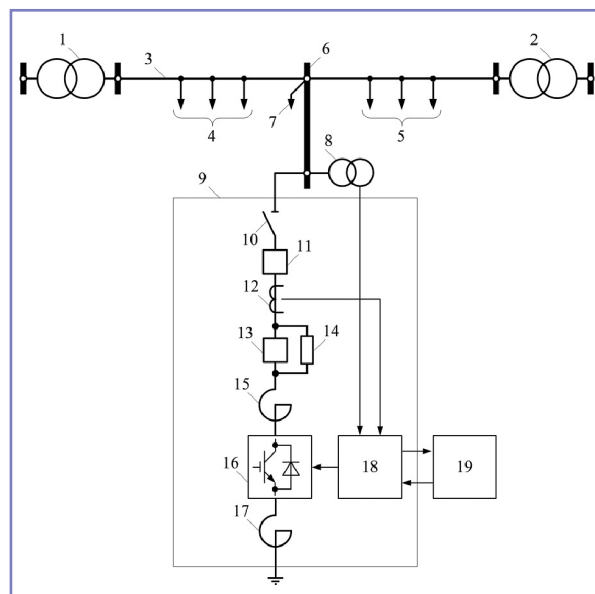


Рис. 3. Схема устройства СГРМ на посту секционирования

где $U_{\text{схх}}$ – напряжение холостого хода ПС (определяется при отсутствии тяговой нагрузки);

$\sum_{i=1}^n \Delta U_{(1)i}$ – сумма потерь напряжения до ПС от токов первой гармоники i -тых электровазов (всего n электровазов);

$\sum_{j=1}^m \Delta U_{(ji)}$ – сумма потерь напряжения до ПС от j -тых гармоник токов (всего m гармоник) i -тых электровазов.

Указанные потери напряжения в (1) определяются произведением соответствующей гармоники тока i -го электроваза на входное сопротивление, отнесенное к ПС.

Алгоритм регулирования СГРМ

Предлагается следующий алгоритм определения тока первой гармоники СГРМ для полной компенсации реактивной мощности нагрузки, относящейся к посту секционирования:

- по напряжению на шинах ПС U_c от трансформатора напряжения определяется третья гармоника напряжения $U'_{(3)}$, то есть она выделяется из суммы в (1) $\sum_{j=1}^m \Delta U_{(ji)}$. Отметим, что, по данным [4], напряжение третьей гармоники в тяговой сети переменного тока может быть в пределах 3,5–12%. Уточним принятые обозначения. Если токи (напряжения) относятся к тяговой сети, то они отмечаются одним штрихом (I' , U'), если токи (напряжения) относятся к СГРМ, то они отмечаются двумя штрихами (I'' , U'');

- если в этот момент работает активный фильтр СГРМ с генерацией инверсного тока третьей гармоники $I''_{(3)}$, то выполняется корректировка напряжения третьей гармоники некомпенсированной тяговой сети:

$$U'_{(3)} = U'_{(3)} + 3I''_{(3)}X_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где $X_{\text{вх}}$ – входное сопротивление ПС, определяется параллельным соединением двух ветвей: одна ветвь представляет суммарное сопротивление подстанции и участка тяговой сети от подстанции 1 до ПС 6, вторая ветвь – аналогичное сопротивление от подстанции 2. В связи с тем, что реактивное сопротивление значительно превосходит активное, допустимо в указанных расчетах заменить полное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ на реактивное $X_{\text{вх}}$;

- определяется ток третьей гармоники некомпенсированной тяговой нагрузки

$$I'_{(3)} = \frac{U'_{(3)}}{3X_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

- определяется ток первой гармоники СГРМ для компенсации реактивной мощности

$$I''_{(1)} = \frac{I'_{(3)}}{K_0}, \quad (4)$$

где K_0 – расчетное значение отношения третьей и первой гармоник тока тяговой сети, методика определения которого дана в [2]. Представим графический алгоритм (рис. 4) расчета первой гармоники тока СГРМ.

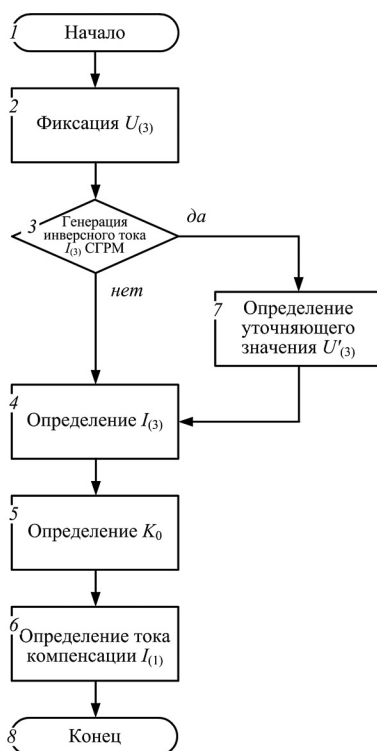


Рис. 4. Алгоритм регулирования СГРМ

Далее подробно остановимся на расчете K_0 .

Закон регулирования мощности СГРМ

Из [4] известно, что для эффективного снижения первой гармоники реактивных токов нагрузки в однородной тяговой сети ток первой гармоники, генерируемый СГРМ в каждый момент i , должен быть равным

$$I''_{(1)} = \left[\sum_{i=1}^k I_{(1)i} \cdot \frac{\ell_i}{\ell_c} + \sum_{i=k+1}^n I_{(1)i} \cdot \frac{\ell - \ell_i}{\ell - \ell_c} \right] \cdot \sin \varphi = \gamma(I_{(1)i}) \sin \varphi, \quad (5)$$

где k – номер электроваза, ближайшего к КУ на участке между КУ и подстанцией 1;
 i – номер электроваза, начиная от подстанции 1;

$I_{(1)i}$ – первая гармоника тока i -того электроваза;

$\gamma(I_{(1)i})$ – функция от токов $I_{(1)i}$,

$i = 1, 2, \dots, n$, определяющая нагрузку, относящуюся к посту секционирования;

φ – среднее значение фазы тока;

ℓ_c – расстояние между тяговой подстанцией и постом секционирования;

ℓ – длина межподстанционной зоны.

Аналогично для компенсации третьей гармоники получим такой же результат (2), но с заменой первой гармоники тока $I_{(1)}$ на третью $I_{(3)}$:

$$I_{(3)i} = \frac{I_{(1)i}}{d}, \quad (6)$$

где d – отношение токов первой и третьей гармонических составляющих некомпенсированной тяговой сети, и ток третьей гармоники, генерируемый СГРМ, равен

$$I''_{(3)} = \left[\sum_{i=1}^k I_{(3)i} \cdot \frac{\ell_i}{\ell_c} + \sum_{i=k+1}^n I_{(3)i} \cdot \frac{\ell - \ell_i}{\ell - \ell_c} \right] = \frac{1}{d} \cdot \left[\sum_{i=1}^k I_{(1)i} \cdot \frac{\ell_i}{\ell_c} + \sum_{i=k+1}^n I_{(1)i} \cdot \frac{\ell - \ell_i}{\ell - \ell_c} \right] = \frac{\gamma(I_{(1)i})}{d}, \quad (7)$$

где $I_{(3)i}$ – третья гармоника тока i -того электроваза.

В результате получим компенсированный ток третьей гармоники, генерируемой СГРМ

$$I''_{(3)} = \frac{\gamma(I_{(1)i})}{d}. \quad (8)$$

Итак, для компенсации токов первой и третьей гармоник некомпенсированной тяговой сети определены токи СГРМ (5) и (7). Разделив токи третьей и первой гармоник в СГРМ, получим закон регулирования мощности СГРМ

$$K_0 = \frac{I''_{(3)}}{I''_{(1)}} = \frac{\gamma(I_{(1)i})}{d \cdot \gamma(I_{(1)i}) \sin \varphi} = \frac{1}{d \cdot \sin \varphi}. \quad (9)$$

Этот закон регулирования свидетельствует о том, что регулировать СГРМ (ток первой гармоники) нужно так, чтобы для некомпенсированной тяговой сети отношение третьей гармоники тока, определяемое по напряжению шин ПС с учетом генерации этой гармоники СГРМ, и первой гармоники, генерируемой СГРМ, всегда соответствовало условию (9).

Как было указано в [4, 5, 6], величина тока третьей гармоники составляет 19–25% от первой. Более точные результаты значения d можно получить на конкретном участке по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии.

Реализация управления СГРМ на посту секционирования

Рассмотрим пример расчета. По трансформатору напряжения шин ПС определили напряжение третьей гармоники (действующее значение) 4,2% от номинального 27,5 кВ. При входном сопротивлении ПС

6,1 Ом ток третьей гармоники тяговой нагрузки (действующее значение), относящейся к ПС, будет равен (3)

$$I'_{(3)} = \frac{U_{(3)}\% \cdot U_{(1)}}{100 \cdot 3 \cdot X_{BX}} = \frac{4,2 \cdot 27500}{100 \cdot 3 \cdot 6,1} = 63,1 \text{ А.} \quad (10)$$

К моменту измерений СГРМ генерирует третью гармонику тока 110 А (амплитудное значение), действующее значение которого составит

$$I''_{(3)} = \frac{I_{(3)}}{\sqrt{2}} = \frac{110}{\sqrt{2}} = 78 \text{ А.} \quad (11)$$

Поэтому сумма токов третьей гармоники, которая необходима для компенсации третьей гармоники тока тяговой сети в соответствии с (2), равна

$$\Sigma I_{(3)} = I'_{(3)} + I''_{(3)} = 63,1 + 78 = 141,1 \text{ А.} \quad (12)$$

Соотношение третьей и первой гармоник тока при $d=1/4$ и $\sin\varphi=0,6$ равно

$$K_0 = \frac{1}{d \cdot \sin\varphi} = \frac{1}{4 \cdot 0,6} = 0,42. \quad (13)$$

В результате в примере ток первой гармоники генерации СГРМ при измеренном напряжении третьей гармоники на шинах ПС 4,2% от номинального 27,5 кВ плюс ток третьей гармоники, генерируемый СГРМ, равен

$$I''_{(1)} = \frac{I''_{(3)}}{K_0} = \frac{141,1}{0,42} = 336 \text{ А.} \quad (14)$$

Технико-экономический расчет применения СГРМ можно выполнить по работе [8], где рассмотрен эффект от повышения пропускной способности участка железной дороги и эффект от снижения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет компенсации реактивной мощности.

Выводы

1. Контролируя напряжение третьей гармоники на посту секционирования, удалось оценить необходимый ток СГРМ для полной компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки, отнесенной к ПС.
2. Тяговую нагрузку, отнесенную к посту секционирования, предложено определять по третьей гармонике тока, рассчитанной на посту секционирования.
3. Предложен алгоритм расчета первой гармоники СГРМ на ПС для компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки.

Литература

1. Никонов А.В. Улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования работы регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности. Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. Наук // Омск: ОмГУПС, 2019. – 124 с.

2. Изобретение № 628580 от 13.04.1977. Способ регулирования мощности поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с выпрямительными установками (Герман Л.А.); опубл. в Б.И. № 38, 1978.
3. Герман Л.А. Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. Часть 2 // ЭЭТ, 2018, № 6, с. 36–40.
4. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1986. – 183 с.
5. Мамошин Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
6. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. – М.: ФГБОУ УМЦ, 2015. – 316 с.
7. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ, 2018, № 5, с. 288–294.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, член-корреспондент Российской академии транспорта. Автор более 390 научных трудов, 100 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Субханвердиев Камилль Субханвердиевич

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Кандидат технических наук. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Разработка и совершенствование алгоритмов селективной и неселективной систем защиты тяговых сетей переменного тока». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает инженером I категории в Проектно-изыскательном институте электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект» – филиале ОАО «Росжелдорпроект». Имеет около 10 публикаций в рецензируемых жур-

налах, 5 патентов на изобретения и полезные модели, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Карпов Иван Петрович

Родился в 1982 году. В 2006 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает старшим электромехаником в Дорожной электротехнической лаборатории Горьковской дирекции по энергообеспечению «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД». Имеет 3 научные публикации и 2 патента на полезные модели.

German Leonid

Was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of Transport Engineers by specialty Engineer routes – electrician (1959). He has defended the dissertation by the theme “Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation”. He is a doctor of technical sciences, professor of the Department of Engineering and technology of railway transport branch of the Samara state University of Railways in Nizhny Novgorod. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. He has 2 government awards.

Subkhanverdiev Camille

Was born in 1989. In 2012 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a degree in “Railways electric power supply”. Candidate of technical sciences. In 2018 he defended his thesis on the topic “Development and improvement of algorithms of selective and non-selective protection systems of electric traction AC networks”. He has 7 years of working experience. At present he is a first class engineer at Design and survey institute of railways electrification and electric power plants “Transelectroproject” – branch of “Roszheldorproject”. He has about 10 publications in peer-reviewed journals, 5 patents for inventions and utility models, 1 computer software registration certificate.

Karpov Ivan

Was born in 1982. In 2006 he graduated from MGUPS (MIIT) with a degree in “Power supply of railroad communications”. Work experience is 13 years. At present he works as a senior electrical engineer in a Railway electric laboratory of Gorkov power supply administration “Transenergo” – branch office of JSC Russian Railways. He has 3 scientific papers and 2 utility patents.

Зарядка электромобилей в начале XX века. Часть 2

// Electric vehicles charging at the beginning of the XX century. Part 2 //

Яковлев В. Ф., к. т. н., доцент,
Самарский государственный технический университет, Самара

В настоящем обзоре рассмотрено устройство домашних и публичных зарядных станций для электромобилей начала XX века при их питании от коммунальных сетей переменного тока. Для преобразования переменного тока в постоянный использовались стеклянные ртутные электродуговые выпрямители, двигатель-генераторы и однопроводные электромашинные преобразователи. Применение таймеров, счетчиков ампер-часов, реле в зарядных станциях позволяло производить ночной заряд аккумуляторных батарей в автоматическом режиме. Имелась развитая сеть публичных зарядных станций и колонок.

Ключевые слова: электромобиль, аккумуляторная батарея электромобиля, заряд электромобиля, зарядная станция.

Аккумуляторные батареи (АБ) заряжаются постоянным током. При наличии у потребителя сети переменного тока обязательной частью зарядной станции является преобразователь переменного напряжения в постоянное. В начале XX века в промышленно выпускаемых зарядных устройствах для электромобилей использовались стеклянные ртутные электродуговые выпрямители и электромашинные преобразователи [1].

This survey considers construction of electric vehicles home and public charging stations for alternative current mains at the beginning of the XX century. The principal means to convert alternative current into direct current were as follows: mercury-arc rectifier; synchronous or rotary converter; motor generator set. Use of timers, ampere-hour meters, and relays made possible home automatic night charge of electric vehicles batteries. There was developed infrastructure of public charging stations.

Keywords: electric vehicle, accumulator battery of electric vehicle, electric vehicle charging, charging station.

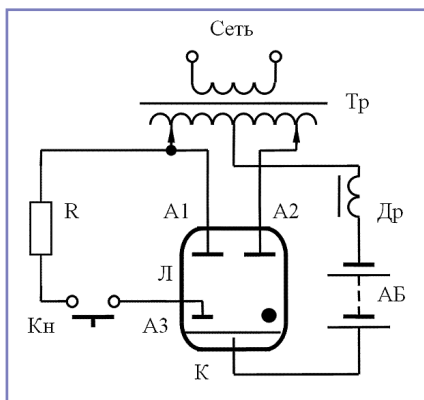


Рис. 1. Зарядное устройство с ртутным выпрямителем

Домашние зарядные станции для сетей переменного тока

Упрощенная схема зарядного устройства с ртутным стеклянным электродуговым выпрямителем представлена на рис. 1. Напряжение сети подается на трансформатор Тр (иногда использовался автотрансформатор) и с его вторичной обмотки – на основные аноды А1 и А2 ртутного выпрямителя Л. Заряжаемая аккумуляторная батарея АБ и дроссель фильтра Др включены между катодом К выпрямителя и отводом от середины вторичной обмотки трансформатора.

На рис. 2 показана фотография зарядной станции General Electric в частном гараже, 1909 год [2]. На передней панели расположены органы управления зарядным устройством, трансформатор установлен на пьедестале на полу.

На рис. 3 приведен вид панели управления с обратной стороны [2]. Ртутный выпрямитель Л выполнен в виде стеклянной запаянной колбы сложной формы с отрезками, воздух из нее откачан до давления 0,001–0,005 мм рт. ст. В колбе имеется небольшое количество ртути. Основные графитовые аноды А1 и А2 размещены в отрезках по сторонам колбы,

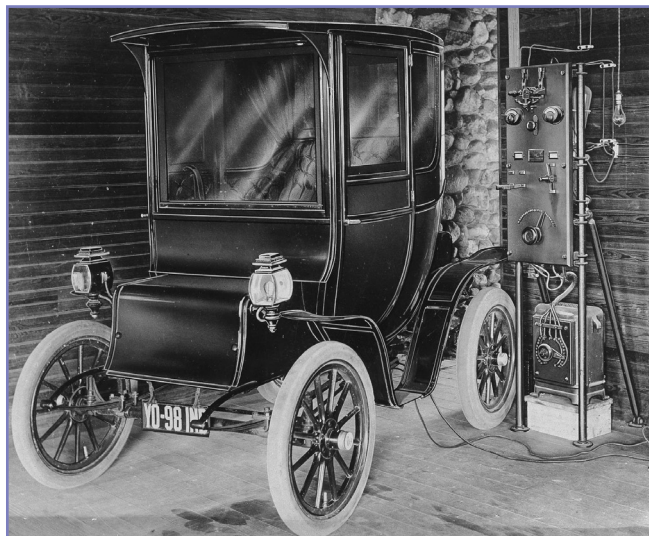


Рис. 2. Домашняя зарядная станция с ртутным выпрямителем

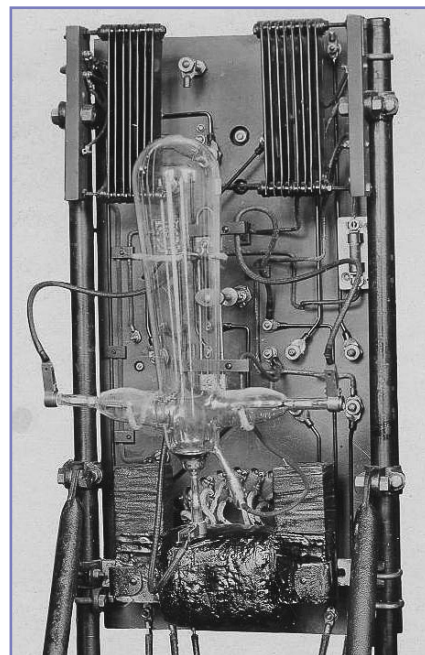


Рис. 3. Панель управления (вид сзади)

катод К – внизу, справа от него дополнительный анод АЗ. Под колбой находится сглаживающий дроссель Др.

На рис. 4 упрощенно показано сечение нижней части колбы с катодом и дополнительным анодом.

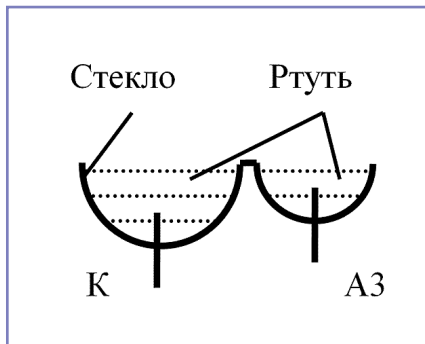


Рис. 4. Сечение нижней части колбы

После подачи сетевого напряжения для инициализации работы выпрямителя колбу слегка наклоняют специальной рукояткой на панели управления. Переливающаяся ртуть замыкает катод К и дополнительный анод АЗ. Оператор нажимает кнопку Кн, через реостат R, катод, анод АЗ идет ток. При возвращении колбы в исходное положение в месте разрыва ртути возникает электрическая дуга. После отпускания кнопки Кн дуга переходит с дополнительного анода на один из рабочих анодов с большим потенциалом. В нормальных условиях, без перегрева колбы, ток в ней обусловлен ионизацией паров ртути. Электрическая дуга в этом случае проводит ток в одном направлении, соединяя в каждом из полупериодов сетевого напряжения анод с более высоким потенциалом и катод. Таким образом, схема на рис. 1 является однофазным двухполупериодным выпрямителем с выводом от нулевой точки трансформатора.

При заряде АБ выпрямитель работает на нагрузку с противо-ЭДС. Индуктивность дросселя Др выбиралась такой, чтобы в рабочем режиме в цепи не возникало условий для реверса зарядного тока, иначе дуга погаснет и самостоятельно не восстановится. В рабочем режиме напряжение на дуге – около 15 В и слабо зависит от тока. Промышленно выпускаемые ртутные выпрямители для заряда АБ электромобилей имели КПД около 80%, рабочий ток – до 50 А, гарантированный срок службы колбы – 300 часов [3]. В них нельзя было использовать фазовое регулирование из-за отсутствия управляющих сеток, поэтому ток заряда изменяли

переключением отводов вторичной обмотки сетевого трансформатора (рис. 1).

В начале XX века, как и сегодня, для владельца электромобиля был удобен заряд АБ в ночные часы без участия человека. Процесс не должен был сопровождаться интенсивным газомыделением и нагревом АБ. Для этого предлагалось устанавливать начальный ток заряда не более 2/3 рекомендованного для данной батареи [4]. Число ампер-часов, необходимое для заряда АБ, и его длительность определялись расходом энергии в предыдущих поездках.

Зарядные станции снабжались опциями, позволяющими частично автоматизировать процесс заряда. Механические таймеры могли отключать установку в заданное время, счетчики ампер-часов – после получения батарей заряда предустановленной величины. Реле тока или напряжения производили коммутацию отводов вторичной обмотки трансформатора, изменяя режим заряда при определенных значениях тока и напряжения. При обрыве дуги в ртутном выпрямителе реле тока могло включить соленоид, качающий колбу для повторной инициации разряда [4].

Имевшиеся технологии не позволяли автоматически управлять текущей величиной тока, как в современных зарядных устройствах. Владелец электромобиля, заряжающий его батарею от сети постоянного тока через реостат или от ртутного выпрямителя, периодически недозаряжал или перезаряжал ее, сокращая срок эксплуатации. Например, в ртутных выпрямителях при токах менее 10 А катодное пятно (место привязки электрической дуги к ртутному катоду) недостаточно прогрето. Дуга горит неустойчиво и часто обрывается. На практике ртутные выпрямители без квалифицированного присмотра позволяли понижать ток заряда до 10–12 А, тогда как для легковых электромобилей рекомендованная величина тока в конце заряда – 4–6 А [5].

Генератор постоянного тока в умформере при соответствующем конфигурировании цепей возбуждения позволял заряжать аккумуляторную батарею при постоянном напряжении с ограничением начального тока. Для потребителя

это наиболее удобный способ заряда, т.к. не требует вмешательства. Зарядные устройства с умформерами имели КПД 70–80% [3].

На рис. 5 приведена фотография зарядной станции с умформером, позволяющая одновременно заряжать аккумуляторные батареи четырех электромобилей. В умформере применены двухфазный асинхронный двигатель МА-4 мощностью 15 л.с. и генератор постоянного тока ML-F мощностью 11,2 кВт [2].

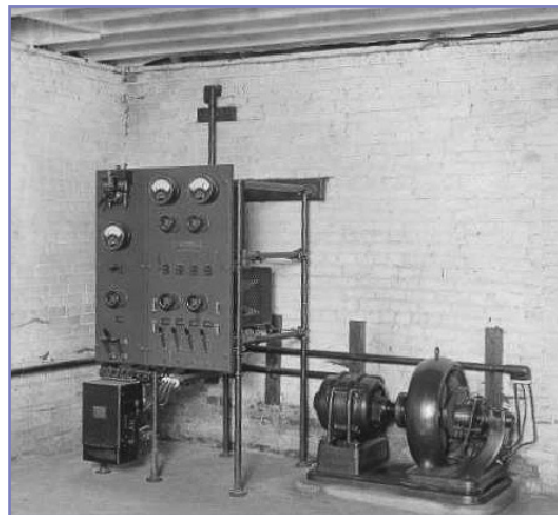


Рис. 5. Зарядная станция с умформером

Расходы на эксплуатацию электромобиля в домохозяйствах при использовании умформеров составляли в среднем 2,87 цента на милю, при использовании ртутных выпрямителей – 5,1 цента [5]. Разница объяснялась сокращением срока службы аккумуляторных батарей и необходимостью их более частой замены из-за периодического недозаряда (перезаряда) во втором случае.

Корпоративные и публичные зарядные станции

Промышленные, торговые, муниципальные предприятия, таксопарки и т.д. на рубеже XX века широко использовали электромобили. Была в наличии и необходимая инфраструктура, включающая помимо развитой дорожной сети корпоративные и общедоступные публичные зарядные станции, где обслуживались электромобили всех желающих на постоянной основе или одновременно. Например, в США, в Новой Англии (штаты Мэн, Нью-Гемпшир, Вермонт, Массачусетс, Род-Айленд, Коннектикут) в 1913 году эксплуатировалась 201 публичная зарядная станция [6]. Сегодня только в одном Массачусетсе 1893 электрозаправки [7],

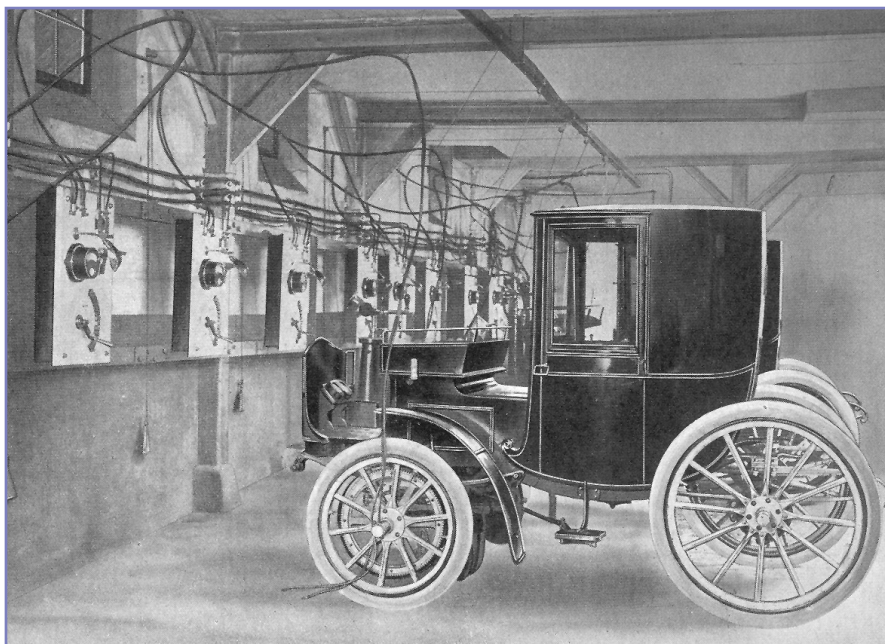


Рис. 6. Электромобиль на зарядной станции

в Москве – 35 [8]. Информация о зарядных станциях приводилась в периодической печати: адрес, величина зарядного тока (обычно 30–100 А, иногда до 500 А), цена киловатт-часа.

На крупной зарядной станции одновременно могли заряжаться 50–100 электромобилей [9]. Как правило, использовались локальные сети постоянного тока с двумя уровнями напряжения. Аккумуляторные батареи электромобилей подключались для заряда к сети через токоограничивающие реостаты. Для

уменьшения потерь энергии на реостатах заряд начинался от сети с напряжением 105 В, а заканчивался от сети 125 В. Сети эти питались от двигатель-генераторов или одноякорных преобразователей мощностью 100–125 кВт. Одноякорные преобразователи имели КПД до 90%, в гаражах индивидуальных автовладельцев их не применяли из-за необходимости в квалифицированном обслуживании [3]. Именно электромашинные преобразователи позволяли реализовывать ускоренный режим заряда. На рис. 6

представлена фотография помещения типичной зарядной станции, в котором осуществлялся заряд АБ электромобилей [2]. Оператор контролировал процесс заряда каждого электромобиля по показаниям приборов на настенных панелях управления. Зарядные станции загружали электрические сети в ночные, не пиковые часы. И в начале XX века, и сегодня это выгодно для электрогенерирующих предприятий [4, 10].

Ртутные выпрямители также использовались на электрозаправках (рис. 7).

В крупных городах возле больших зарядных станций устанавливали зарядные колонки (ее упрощенное изображение приведено на рис. 8). На чугунном пьедестале в сварном корпусе, защищенном от непогоды, помещались вольтметр, амперметр, коммутационная аппаратура и угольный реостат [2]. По кабелю в канале под тротуаром к колонке подавалось постоянное напряжение от ближайшей зарядной станции. Оттуда ее и включали по просьбе автовладельца. Колонки выпускались на токи заряда до 100 и 150 А.

Имелась техническая возможность установить монетоприемники на зарядные колонки и использовать их как автоматы самообслуживания, предоставляющие покупателю оплаченное количество электроэнергии. Этого не сделали, т.к. из-за неполной стандартизации автовладельцам все равно приходилось вызывать техника с ближайшей зарядной станции для подбора зарядного кабеля [2].

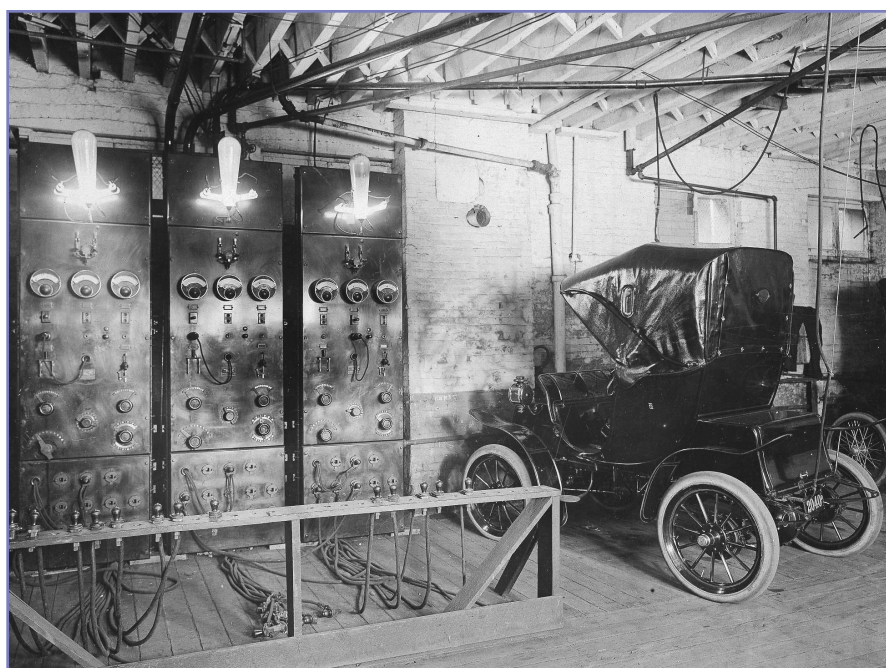


Рис. 7. Ртутные выпрямители на зарядной станции, 1907 год.

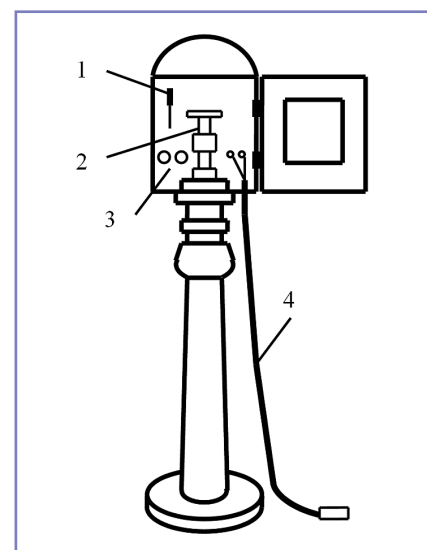


Рис. 8. Зарядная колонка, крышка открыта: 1 – рубильник, 2 – маховик угольного реостата, 3 – амперметр и вольтметр, 4 – кабель с разъемом для подключения электромобиля

Выводы

На рубеже XX века зарядные станции для электромобилей реализовывались при питании от сетей переменного тока на основе ртутных электродуговых выпрямителей, двигатель-генераторов и одноякорных электромашинных преобразователей. Они снабжались таймерами, счетчиками ампер-часов, реле тока и напряжения, что позволяло частично автоматизировать процесс заряда в ночные часы. Это было особенно удобно автолюбителям, заряжающим электромобили в собственных гаражах.

В окрестностях больших городов существовала развитая сеть корпоративных и публичных зарядных станций, зарядные колонки размещались на улицах. На рубеже XX века пользоваться электромобилями было почти так же удобно, как и сегодня.

Литература

1. Hawkins electrical guide № 6. – New York, USA: Theo Audel & Company, 1914. – 280.
2. Wilson S. Early electric car charging. [Электронный ресурс]. – URL: <https://evadc.org/2013/05/17/early-electric-car-charging/> (дата обращения: 21.02.2019).
3. Operating records committee report. Electric vehicles, 1915, 6(1), pp. 29–33.
4. Cushing H. C. The electric vehicle hand-book. 10th ed. – New York, NY: H. C. Cushing, Jr., 8 West 40th street, 1922. – 358.
5. Lincoln F. Charging apparatus for private garages. Electric vehicles, 1914, 5(6), 204–206.
6. Electric motor club at Boston. Electric vehicles, 1913, 3(6), p. 78.
7. US Department of energy. Alternative fuels data center. Electric charging station locations by state. [Электронный ресурс]. – URL: <https://afdc.energy.gov/data/10366> (дата обращения: 27.02.2019).
8. Электрозаправки – Портал открытых данных. Правительство Москвы. [Электронный ресурс]. – URL: <https://data.mos.ru/opendata/7704786030-elektrozapravki?pageNumber=1&versionNumber=1&releaseNumber=14> (дата обращения: 27.02.2019).
9. Operating features of a large electric garage. Electric vehicles, 1915, 7(6), pp. 209–210.
10. Бузыкканов Н.С., Сидоров К.М. Зарядная инфраструктура для электромобилей в условиях существующей энергетической системы:

проблемы и пути решения // Электроника и электрооборудование транспорта, 2018, № 2, с. 19–25.

Яковлев Вадим Фридрихович

Родился в 1953 году. В 1975 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Информационно-измерительная техника». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Опыт работы – 45 лет. Имеет 20 авторских свидетельств на изобретения, более 40 научных статей, 4 монографии.

Yakovlev Vadim

Was born in 1953. In 1975 graduated from Kuybyshev Polytechnic Institute, specialization is "Information-measuring technology". He is a candidate of engineering, senior staff scientist, associate professor of Theoretical and general electrical engineering departments of Samara State Technical University. He has 45 year experience. He is the author of 20 author's certificate, more than 40 scientific articles, 4 monographs.

Модуляционная система управления матричным преобразователем на основе прямого метода регулирования

// Modular control system matrix converters based on direct methods of regulation //

Ле Ван Тунг, Васильев Б. Ю., к.т.н.,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург
Буй Тхань Нху, к.т.н.,
Промышленный университет Куангнинь, Вьетнам

В настоящее время матричные преобразователи частоты являются наиболее привлекательными для использования в электроприводах, так как обладают большими преимуществами в сравнении с двухзвенными преобразователями частоты с односторонней проводимостью. В данной статье представлена методика прямой пространственно-векторной модуляции для матричного преобразователя частоты. Этот способ имеет много преимуществ по сравнению с другими методами управления (Venturini и 3M), а именно более простой способ расчета коэффициентов модуляции для переключения полупроводниковых ключей на основе расчета входного напряжения и коэффициента использования преобразователя на уровне 0,866. При использовании прямого метода управления входное напряжение матричного преобразователя имеет синусоидальную форму. Входной ток также синусоидален и синфазен входному току, т.е. матричный преобразователь работает с коэффициентом мощности 1. Результаты данной методики проверены с помощью программного обеспечения Matlab&Simulink.

Ключевые слова: матричный преобразователь частоты, пространственно-векторная модуляция, прямой метод управления, имитационное моделирование.

Общие сведения и структура матричного преобразователя

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) – это непосредственный преобразователь частоты, построенный на основе полупроводниковых модулей с двухсторонней проводимостью [1, 2]. Структурная схема электропривода с матричным преобразователем частоты представлена на

Currently, matrix converters are the most suitable for use in electric drives, because they have greater advantages than two-stage frequency converters with unilateral conductance. This article presents the method of direct space-vector modulation for a matrix frequency converter. This method has many advantages compared to Venturini and 3M control methods, namely a simpler method of calculating modulation factors for switching semiconductor switches based on the calculation of the input voltage and the utilization factor of the converter at the level of 0.866. When using the direct control method, the input voltage of the matrix converter is sinusoidal and the input current is also sinusoidal and in phase matrix converter operates with a power factor of one. The results of the method are verified in Matlab&Simulink software.

Keywords: matrix frequency converter, space-vector modulation, direct control method, simulation modelling.

рис. 1. Преобразователь состоит из девяти модулей и сетевого фильтра. Схема модулей матричного преобразователя может быть различной. Некоторые варианты модулей преобразователя представлены на рис. 2.

Основные преимущества матричного преобразователя заключаются в возможности двухстороннего обмена энергией, регулировании формы входного тока, что необходимо для обеспечения синусоидальной формы входного тока и напряжения, регулирования коэффициента мощности вплоть до единицы [3].

Главная проблема использования матричных преобразователей заключается в более сложной, чем в двухзвенном преобразователе, системе модуляционного управления, а также в более сложных способах модификации системы модуляции [4, 5].

Классификация систем управления матричными преобразователями

В настоящее время существует несколько типов систем модуляционного управления матричными преобразователями, например:

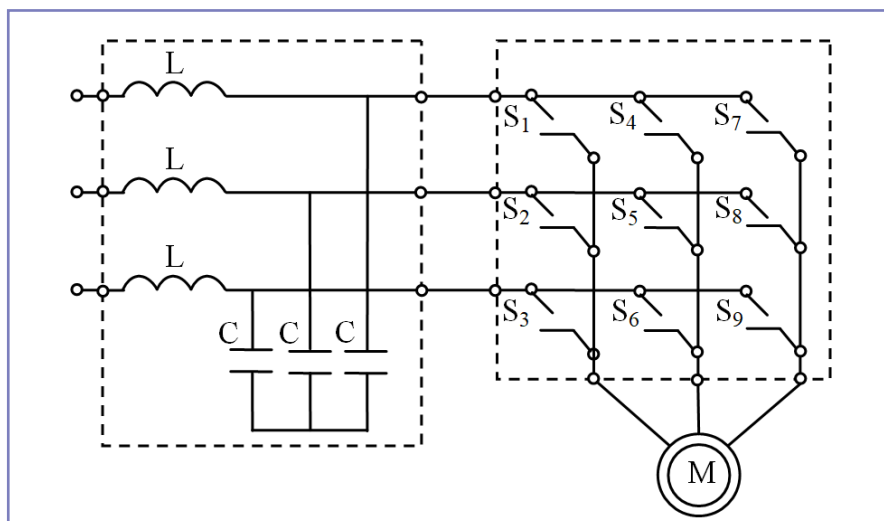


Рис. 1. Схема матричного преобразователя частоты

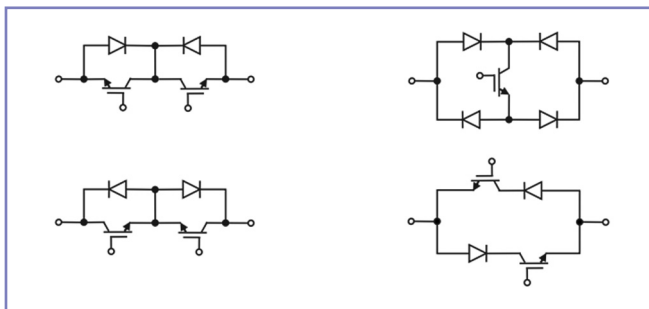


Рис. 2. Схема модулей матричного преобразователя

- Venturini – Alesina;
- 3M (max, medium, min);
- косвенная пространственная векторная модуляция (indirect space vector modulation);
- прямая пространственная векторная модуляция (direct space vector modulation).

Система модуляции Venturini – Alesina обладает следующими недостатками [6, 7, 8]: алгоритм требует сложных вычислений, нескольких тригонометрических преобразований и непрерывного измерения входного напряжения с высокой точностью.

Система модуляции 3M более простая, но ее главный недостаток заключается в высокой зависимости качества управления от точности вычислительных и измерительных операций [9, 10, 11].

В настоящей статье рассматриваются методы прямой модуляции, представлены результаты моделирования матричного преобразователя частоты с данными системами управления и выполнен анализ эффективности его работы с рекомендациями по использованию этих систем управления.

Система прямой модуляции матричного преобразователя

Структурная схема МПЧ показана на рис. 1. На этой схеме выходное напряжение формируется из входного напряжения, выходной ток определяется нагрузкой, при этом входной ток формируется из выходного тока. Целью прямого метода модуляции является потребление трехфазного напряжения и тока синусоидальной формы с возможностью регулирования коэффициента мощности, т.е. угла сдвига фаз между кривыми входного тока и напряжения. Таким образом, преимущества матричного преобразователя частоты заключаются в высоком уровне электромагнитной и энергетической совместимости за счет двухсторонней проводимости преобразователя.

Для формирования прямого алгоритма управления необходимо определить пространственные векторы тока и напряжения. В теории пространственно-векторного преобразования трехфазная система напряжения

может быть представлена вектором, вращающимся вокруг начала отсчета квадратной системы координат $0\alpha\beta$, следующим образом (рис. 4) [12, 13]

$$u_0 = \frac{2}{3} \left(U_{AB} + e^{\frac{2j\pi}{3}} U_{BC} + e^{\frac{4j\pi}{3}} U_{CA} \right). \quad (1)$$

Если система имеет желаемое выходное напряжение трех симметричных фаз, оно может быть выражено как:

$$u_{AB} = U_0 \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{6});$$

$$u_{BC} = U_0 \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3});$$

$$u_{CA} = U_0 \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}),$$

где U_0 , ω_0 – амплитуда и угловая частота требуемого выходного напряжения.

Вектор напряжения также может быть представлен в следующем виде:

$$\vec{u} = u(t)e^{j(\omega_0 t)} = U_0 e^{j\frac{\pi}{6}} e^{j(\omega_0 t)}.$$

Таким образом, вектор напряжения представляет собой вектор с постоянной длиной, равный U_0 , вращающийся вокруг начала системы координат с угловой скоростью ω_0 .

Таким же образом может быть представлен вектор входного тока МПЧ (рис. 3):

$$i_0 = \frac{2}{3} \left(i_A + e^{\frac{2j\pi}{3}} i_B + e^{\frac{4j\pi}{3}} i_C \right) = I_0 e^{j(\omega_0 t)};$$

$$e_i = \frac{2}{3} \left(u_a + e^{\frac{2j\pi}{3}} u_b + e^{\frac{4j\pi}{3}} u_c \right) = E_i e^{j(\omega_i t)};$$

$$i_i = \frac{2}{3} \left(i_a + e^{\frac{2j\pi}{3}} i_b + e^{\frac{4j\pi}{3}} i_c \right) = I_i e^{j(\omega_i t)}.$$

Для создания модуляционного закона управления вектор входного напряжения удобно преобразовать в следующий вид:

$$u_i = \frac{2}{3} \left(U_{ab} + e^{\frac{2j\pi}{3}} U_{bc} + e^{\frac{4j\pi}{3}} U_{ca} \right) = U_i(t) e^{j(\omega_i t + \frac{\pi}{6})} \text{ э.}$$

Каждый модуль матричного МПЧ, состоящий из двух силовых ключей, должен коммутироваться в соответствии с двумя правилами [14, 15]:

- отсутствие двухфазного короткого замыкания;

- неоткрытие какой-либо фазы на выходе.

Использование данных правил необходимо для того, чтобы избежать перенапряжения, вызванного внезапными отключениями питания.

Значения длин векторов и фазовых углов представлены в [2]. При использовании указанных правил возможны 27 состояний, из которых 18 первых состояний – это векторы с фиксированным вектором напряжения, или стандартные векторы. Векторы 19–21 являются нулевыми, где выходные фазы подключены к соответствующим векторам. Последние 6 векторов соответствуют схемам включения матричного преобразователя частоты, когда выходные фазы подключены к различным входным фазам. В этих состояниях вектор выходного напряжения также будет соответствовать вектору входного напряжения. Эти векторы не используются в прямом пространственно-векторном управлении матричного преобразователя частоты.

Включение стандартных или нулевых векторов будет определять время включения силовых ключей матричного преобразователя, тем самым определяя угловое смещение вектора выходного напряжения и тока, что является основным принципом синтеза прямого управления преобразователем.

На основе комбинаций пространственного положения векторов входного напряжения и тока (рис. 3 и 4) разработан комплекс всех возможных комбинаций включения силовых ключей матричного преобразователя частоты. Стандартные векторы делят плоскость на шесть равных секторов, которые пронумерованы от I до VI.

По теоретическим расчетам, основанным на анализе диаграмм пространственного положения векторов входного тока и напряжения, можно рассчитать коэффициенты модуляции системы управления МПЧ следующим образом:

$$d_1 = \frac{2|U_0| \sin(\Delta_0) \sin(\frac{\pi}{3} - \Delta_1)}{\sqrt{3}|U_i| \cos \varphi_i};$$

$$d_2 = \frac{2|U_0| \sin(\Delta_0) \sin(\Delta_1)}{\sqrt{3}|U_i| \cos \varphi_i};$$

$$d_3 = \frac{2|U_0| \sin(\frac{\pi}{3} - \Delta_0) \sin(\frac{\pi}{3} - \Delta_1)}{\sqrt{3}|U_i| \cos \varphi_i};$$

$$d_4 = \frac{2|U_0| \sin(\frac{\pi}{3} - \Delta_0) \sin(\Delta_1)}{\sqrt{3}|U_i| \cos \varphi_i}.$$

Абсолютные значения коэффициентов модуляции d_1, d_2, d_3, d_4 представляют

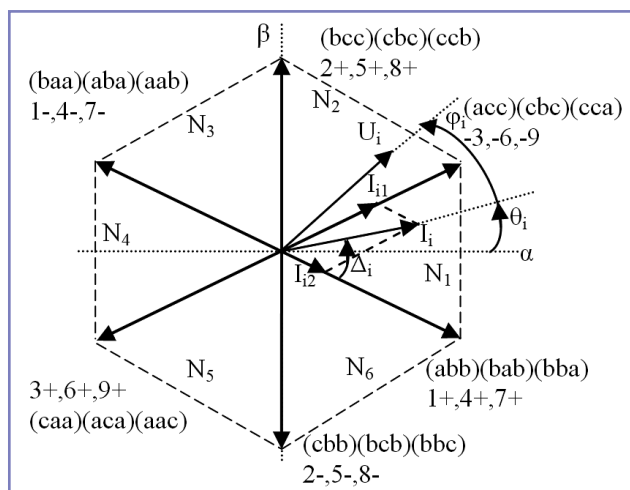


Рис. 3. Выходные векторы тока

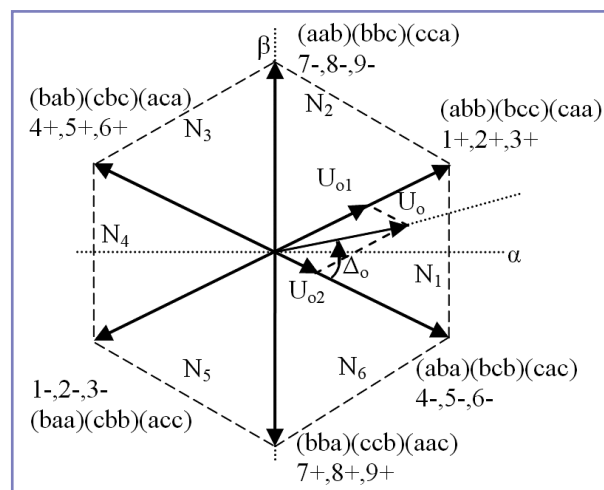


Рис. 4. Векторы выходного напряжения

собой относительное время действия векторов, используемых в каждый период модуляции.

Для реализации правил модуляции сумма абсолютных значений относительных периодов включения базовых векторов должна удовлетворять следующему неравенству

$$|d_1| + |d_2| + |d_3| + |d_4| \leq 1.$$

Из формулы для расчета коэффициентов модуляции видно, что

$$U_0 \leq U_i \frac{\sqrt{3}}{2} |\cos \varphi_i|. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что максимальная амплитуда выходного напряжения может достигать $\sqrt{3}/2$ от амплитуды входного напряжения. Таким образом, коэффициент использования преобразователя по напряжению

$$m = \frac{U_0 \sqrt{3}}{U_i 2}.$$

При работе прямого алгоритма управления в матричном преобразователе порядок чередования векторов на периоде модуляции может быть произвольным. Порядок переключения влияет на

количество переключений силовых ключей (частоту модуляции) и коэффициент нелинейного искажения выходного тока.

Из приведенных выше требований и анализа комбинаций включения силовых ключей, выбранных в секторах, порядок выполнения векторов должен соответствовать следующему правилу:

- если сумма номеров секторов тока и напряжения является четным числом, то коммутация ключей должна проходить в следующем порядке:

$$d_1 \rightarrow d_3 \rightarrow d_4 \rightarrow d_2 \rightarrow d_0 \rightarrow d_2 \rightarrow d_4 \rightarrow d_3 \rightarrow d_1;$$

- если сумма номеров секторов тока и напряжения является нечетным числом, то коммутация ключей должна проходить в следующем порядке:

$$d_3 \rightarrow d_1 \rightarrow d_2 \rightarrow d_4 \rightarrow d_0 \rightarrow d_4 \rightarrow d_2 \rightarrow d_1 \rightarrow d_3.$$

Эти последовательности переключения показаны в последнем столбце таблицы 1.

Результаты моделирования

Для исследования эффективности использования прямого метода модуляции матричного преобразователя частоты выполнялось имитационное моделирование в Matlab.

Схема имитационной модели представлена на рис. 5. Имитационная модель имеет следующие параметры: входное напряжение 220 В, 50 Гц, сопротивление нагрузки $R = 2$ Ом, индуктивность $L = 10$ мГн.

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 6–9.

Результаты показывают, что входной ток инвертора имеет импульсную форму, почти идентичную входному напряжению. Входные ток и напряжение синфазны, а использование сетевого фильтра позволяет

Таблица 1. Порядок формирования стандартных векторов выходного и входного напряжения в шестом секторе

Сектор напряжения и тока $N_v - N_i$ d_2	Комбинация переключателя и переключатель						
		d_1	d_0				Порядок переключения
U1-I1	U4-I4	aca	aba	acc	abb	ccc	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U1-I2	U4-I5	bcb	aca	bcc	acc	bbb	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U1-I3	U4-I6	bab	bcb	baa	bcc	aaa	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U1-I4	U4-I1	cac	bab	caa	baa	ccc	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U1-I5	U4-I2	cbc	cac	cbb	caa	bbb	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U1-I6	U4-I3	aba	cbc	abb	cbb	aaa	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U2-I1	U5-I4	acc	abb	aac	aab	ccc	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U2-I2	U5-I5	bcc	acc	bbc	aac	bbb	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U2-I3	U5-I6	baa	bcc	bba	bbc	aaa	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U2-I4	U5-I1	caa	baa	cca	bba	ccc	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U2-I5	U5-I2	cbb	caa	ccb	cca	bbb	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U2-I6	U5-I3	abb	cbb	aab	ccb	aaa	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U3-I1	U6-I4	aac	aab	cac	bab	ccc	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U3-I2	U6-I5	bbc	aac	cbc	cac	bbb	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U3-I3	U6-I6	bba	bbc	aba	cbc	aaa	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U3-I4	U6-I1	cca	bba	aca	aba	ccc	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$
U4-I5	U6-I2	ccb	cca	bcb	aca	bbb	$d_1 - d_3 - d_4 - d_0 - d_2 - d_4 - d_3 - d_1$
U3-I6	U6-I3	aab	ccb	bab	bcb	aaa	$d_3 - d_1 - d_2 - d_4 - d_0 - d_4 - d_2 - d_1 - d_3$

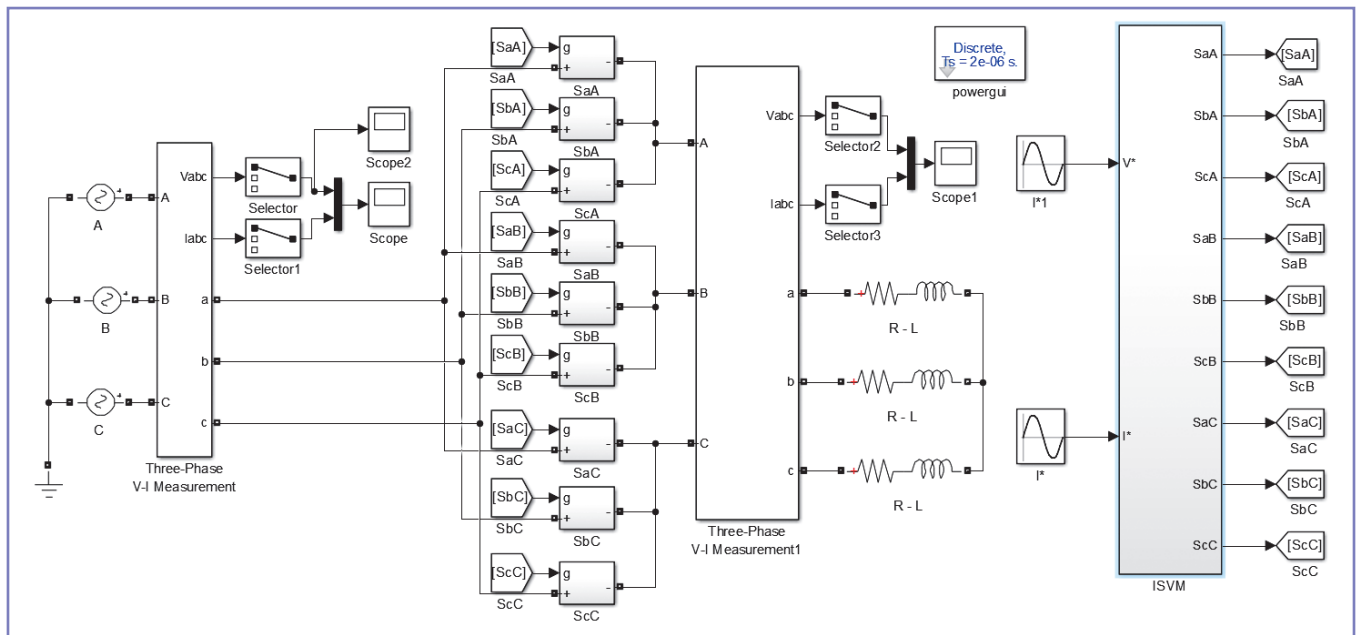


Рис. 5. Схема моделирования для DSVM

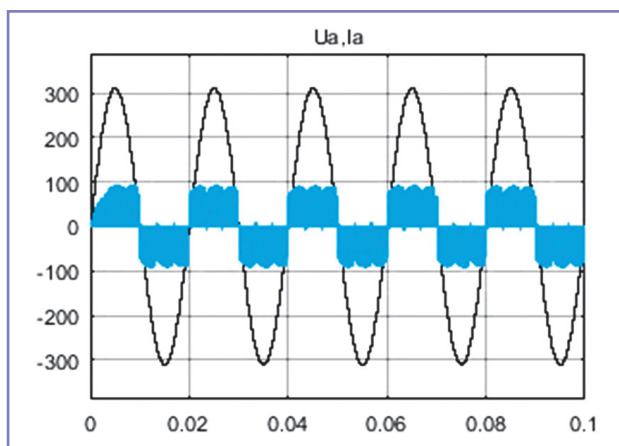


Рис. 6. Входное напряжение и ток на входе

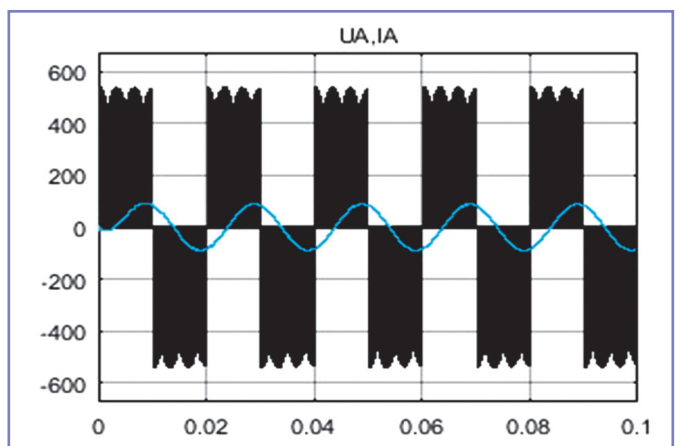


Рис. 7. Напряжение и ток при нагрузке

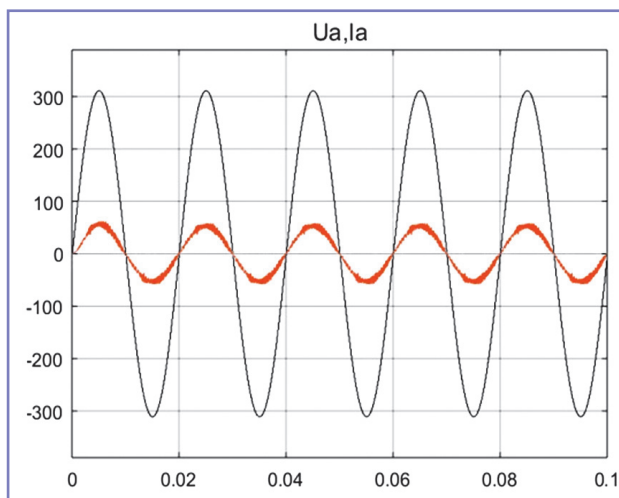


Рис. 8. Напряжение и ток на входе при наличии фильтра

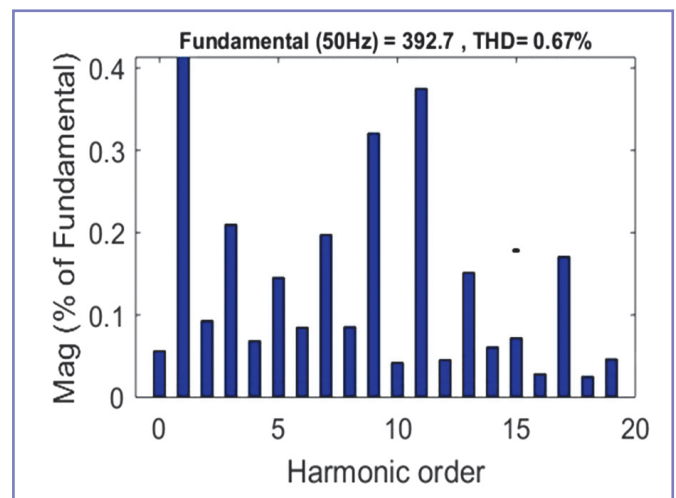


Рис. 9. Коэффициент искажения напряжения на выходе

добиться единичного коэффициента мощности сети.

Выводы

В методе прямой модуляции предполагается, что МПЧ имеет структуру матрицы 3×3 . Алгоритм пространственно-векторной модуляции строится на основе всех возможных векторов напряжений и токов и всех комбинаций включения силовых ключей матричного преобразователя частоты.

Преимущество прямой модуляции заключается в том, что в каждом цикле выборки можно определить фазовый угол входного напряжения относительно времени напряжения источника, независимо от мгновенного значения напряжения. Выходное напряжение определяется требуемой частотой и коэффициентом модуляции. Таким образом, для реализации управления требуется минимальное количество переключений, что позволяет преобразователю работать с меньшими потерями.

Литература

1. Кокорин Н.В. Моделирование матричного преобразователя / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики, 2009, № 1, с. 47–52.
2. Сидоров С.Н. Матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления / С.Н. Сидоров // Силовая электроника, 2009, № 3.
3. Кокорин Н.В. Анализ устойчивости системы с матричным преобразователем частоты и входным фильтром / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Электричество, 2010, № 1, с. 43–47.
4. Кокорин Н.В. Комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей матричного преобразователя / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Электричество, 2009, № 11, с. 52–56.
5. Климов В.Н. Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока / В.Н. Климов, С.В. Климова // Силовая электроника, 2008, № 4, с. 20–24.
6. Satheesh G., Chamdranth N., Priyanka P. Modelling of matrix converter based on venturini modulation scheme. 2007. IJAICT, vol. 3, Issue 11, pp. 1197–1205.
7. Karaca H., Akkaya R. Modeling, simulation and analysis of matrix converter using Matlab&Simulink. International journal of modeling and optimization, vol. 2, No. 3, June 2012.
8. Karaca H., Akkaya R. «Control of venturini method based matrix converter in Input voltage variation» in pro-ceedings of the International multicongress of engineers and computer scientists. 2009. Vol. II, pp. 1412–1416.
9. Larsen K.B., Jorgensen A.H., Helle L., Blaabjerg F. Analysis of symmetrical pulse width modulation strategies for matrix converters. 2002. IEEE33rd Annual, vol. 2, pp. 899–904.
10. Kolar J.W., Baumann, M., Schafmeister F., Ertl H. Novel three-phase AC-DC-AC sparse matrix converter. 17rd annual, vol. 2, pp. 777–791.
11. Milanovic M., Dobaj B. Unity input displacement factor correction principle for direct AC to AC matrix converters based on modulation strategy. Circuits and systems I: fundamental theory and applications. 2000. IEEE Transactions on, vol. 47, Issue 2, pp. 221–230.
12. Wheeler P.W., Rodriguez J., Clare J.C. et al. Matrix converters: a technology Review. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, No. 2, pp. 276–288, April 2002.
13. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
14. Casadei D., Serra G., Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, No. 3, pp. 401–409, June 1998.
15. Karaca H., Akkaya R., Dogan H. A novel compensation method based on fuzzy logic control for matrix converter under distorted input voltage conditions, 18th International conference on electrical machines, IECM 2008, vol. 1–4, pp. 1481–1485, 2008, Sep. 6–9, Portugal.

Ле Ван Тунг

Родился в 1987 году. В 2013 году окончил Технологический университет Тхайнгуен (Вьетнам). Опыт работы – 9 лет. В настоящее время учится в аспирантуре Санкт-Петербургского горного университета. Имеет около 15 публикаций в рецензируемых журналах.

Васильев Богдан Юрьевич

Родился в 1987 году. Окончил Санкт-Петербургский горный университет по специальности «Электротехнические комплексы и системы». Кандидат технических наук. В 2013 году защитил диссертацию по теме «Структура и эффективные алгоритмы управления электроприводом центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика и электромеханика» в Санкт-Петербургском горном университете. Имеет около 20 публикаций в рецензируемых журналах.

Буй Тхань Нху

Родился в 1970 году. В 2014 году окончил Ханойский университет горного дела и геологии (Вьетнам). Кандидат технических наук. В 2014 году защитил диссертацию по теме «Исследование некоторых параметров гидравлических стоек, используемых при подземной добыче угля в угольном регионе Куангнинь». Опыт работы – 25 лет. В настоящее время работает в Промышленном университете Куангнинь (Вьетнам). Имеет около 20 публикаций в рецензируемых журналах.

Le Van Tung

Was born in 1987. In 2013 he graduated from Thái Nguyên University of Technology, Vietnam. Work experience is 9 years. At present he studies for his Ph.D. at Saint-Petersburg Mining University. He has almost 15 published works in peer-reviewed journals.

Vasilyev Bogdan

Was born in 1987. He graduated from Saint-Petersburg Mining University with a degree in “Electrical engineering devices and systems”. Candidate of engineering sciences. In 2013 he defended his thesis on the topic “Structure and efficient algorithms of the electric drive control of centrifugal blower of gas-compressor unit”. Work experience is 10 years. At present he works as an associate professor of the Department of electric power and electrical engineering at Saint-Petersburg Mining University. He has almost 20 published works in peer-reviewed journals.

Bui Thanh Nhu

Was born in 1970. In 2014 he graduated from Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam. Candidate of engineering sciences. In 2014 he defended his thesis on the topic “Investigation of some characteristics of hydraulic supports used when underground coal mining in the Kuangnin coal region”. Work experience is 25 years. At present he works in Kuangnin University of Industry, Vietnam. He has almost 20 published works in peer-reviewed journals.

Пути уменьшения пусковых потерь в тяговом электроприводе ЭПС постоянного тока

// Ways to reduce starting losses in a DC traction electric drive EPS //

Евстафьева М. В., Изварин М. Ю., к. т. н., доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Рассмотрен вариант модернизации электрического подвижного состава с помощью применения статического преобразователя собственных нужд, используемых в качестве источника питания бортовых цепей и устройств для заряда аккумуляторных батарей, для уменьшения пусковых потерь в тяговом электроприводе. Статический преобразователь имеет достаточно высокую перегрузочную способность, что позволит осуществить плавное трогание электропоезда с места, движение с низкой скоростью и маневровые перестановки. Представлено схемотехническое решение питания цепей тяговых электродвигателей от вторичной обмотки статического трансформатора статического преобразователя собственных нужд с использованием управляемого выпрямителя.

Ключевые слова: модернизация ЭПС, энергоэффективность, статический преобразователь, пусковые потери.

The article considers the possibility of rolling stock modernization by using a static converter, used as a power source for on-board circuits and devices for charging batteries, to reduce starting losses in the traction drive. The static converter has a quite high overload capacity, which will allow for smooth starting of the train, moving at low speed and shunting movements. A circuit for supplying traction motor from the secondary winding of a static transformer of a static converter using a controlled rectifier is presented.

Keywords: rolling stock modernization, energy efficiency, static converter, starting losses.

Схема электрификации железных дорог в России исторически сложилась таким образом, что наиболее крупные узлы (Московский, Санкт-Петербургский), а также соединяющий их участок Октябрьской железной дороги электрифицированы по системе постоянного тока с напряжением в контактной сети 3 кВ. Это обуславливает использование именно здесь наибольшего количества моторвагонных электропоездов (в частности, за все время Демиховским машиностроительным заводом выпущено более 600 электропоездов постоянного тока различных серий и только 300 переменного тока). Кроме того, электропоезда постоянного тока выпускались также Торжокским вагоностроительным заводом. В то же

время и большинство выпущенных, и выпускаемые в настоящее время электропоезда серий ЭР2Т, ЭД4М, ЭТ2, ЭП2Д имеют двигатели постоянного тока последовательного возбуждения и устаревшую систему реостатного пуска [1, 2, 3]. Эта система имеет значительные (до 12%) пусковые потери и не может обеспечить современные требования к плавности пуска.

После введения ограничений по требованиям безопасности движения, предусматривающих длительное движение со скоростью 5–10 км/ч на тупиковых путях вокзалов и пассажирских станций, стали проявляться и другие недостатки системы. Так, маневровая позиция электропоезда не может быть использована для длительного

движения на низкой скорости по нескольким причинам:

- мягкая реостатная характеристика обеспечивает трогание с места с заданным током, но при дальнейшем разгоне не может стабилизировать скорость. В этом режиме скорость электропоезда будет медленно увеличиваться до 40–50 км/ч;

- на электропоездах не предусматривается принудительное охлаждение пусковых резисторов, поэтому при длительном движении на маневровых позициях возможен их недопустимый перегрев.

Это вынуждает машинистов применять многократные повторные включения и отключения тяги, что негативно сказывается на плавности хода, вызывает повышенный износ коммутационной аппаратуры, прежде всего линейных контакторов, а возникающие толчки тяги уменьшают срок службы тягового привода и поглощающих аппаратов.

Учитывая, что большинство имеющих в парке электропоездов имеют большой остаточный срок службы – до 30–40 лет, модернизация силовой схемы тягового привода электропоездов с реостатным пуском является актуальной задачей.

Мировой опыт показывает, что модернизация электрического подвижного состава наиболее целесообразна по следующим вариантам совершенствования подвижного состава (рис. 1).

Первый из предложенных вариантов является самым дорогостоящим, хотя и придает ЭПС принципиально новые эксплуатационные характеристики. Это связано прежде всего со значительным изменением в конструкции моторных вагонов, причем изменения вносятся как в механическую, так и в электрическую часть. Характерный пример – произведенная компанией ZNTK Oleśnica модернизация локомотива Intercity Class EU07 (эксплуатируется Государственными железными дорогами Польши (PKP),



Рис. 1. Варианты модернизации



Рис. 2. Электровоз EU07

ставшего пилотным образцом для возможной реализации более масштабной программы. В результате проведенных работ мощность локомотива увеличилась с 2 до 3,2 МВт, максимальная скорость – с 125 до 160 км/ч.

В ходе модернизации тяговые электродвигатели постоянного тока были заменены трехфазными двигателями переменного тока Emit Zychlin EY541X4, питающимися от инверторов Medcom FT-1600–3000. Компания Enica осуществила поставку вспомогательного оборудования, IPS Tabor предоставила системы диагностики микропроцессорных локомотивных устройств, системы регулирования и пневматическое оборудование [4].

Ко второй группе относится модернизация промышленного электровоза серии EL2 в Германии. Глубокая модернизация парка из более 50 электровозов EL2 компании Vattenfall Europe Mining, работающих на угольных шахтах, предусматривала полное переустройство электро- и пневмооборудования, но не изменила их мощность, поскольку

тяговые двигатели остались прежними (рис. 3).

Реализован ряд мероприятий, прежде всего система резисторно-контакторного регулирования заменена регулятором постоянного тока, построенным на элементах силовой электроники, что позволило использовать рекуперативное торможение. Микропроцессорная система централизованного управления тягой и торможением управляет также работой вспомогательного преобразователя через последовательную информационную шину CAN. Упрощенная принципиальная силовая схема приведена на рис. 4. Напряжение от контактной сети подается с помощью двух главных (центральных) или вспомогательных боковых токоприемников через быстродействующий выключатель SF. Скорость регулируется путем изменения напряжения на выходе преобразователей U_1 и U_2 . В режиме тяги двигатели подключаются по схеме последовательного возбуждения, а в режиме торможения происходит независимое возбуждение тяговых двигателей, с питанием обмоток

возбуждения от вспомогательного преобразователя U3. Смена режимов осуществляется с помощью реверсивных и тормозных переключателей.

Ко второму типу модернизации можно отнести также электропоезда ЭР12 и ЭР2И, разработанные в 1970–1980-х годах, и ЭМ4 2006 года.

В 1976 году Рижский вагоностроительный завод совместно с Рижским электромашиностроительным и Таллинским электротехническим заводами выпустил первый опытный образец электропоезда постоянного тока типа ЭР12 с тиристорно-импульсным регулированием напряжения и возбуждения тяговых электродвигателей в режиме тяги.

Электропоезд ЭР12 был создан на базе механической части поезда ЭР2, при этом были максимально использованы существующая на ЭР2 тяговая аппаратура и вспомогательное электрооборудование. По сравнению с ЭР2 на электропоезде ЭР12 дополнительно установлена аппаратура импульсного регулирования, применено авторежимное устройство, регулирующее



Рис. 3. Электровоз EL2

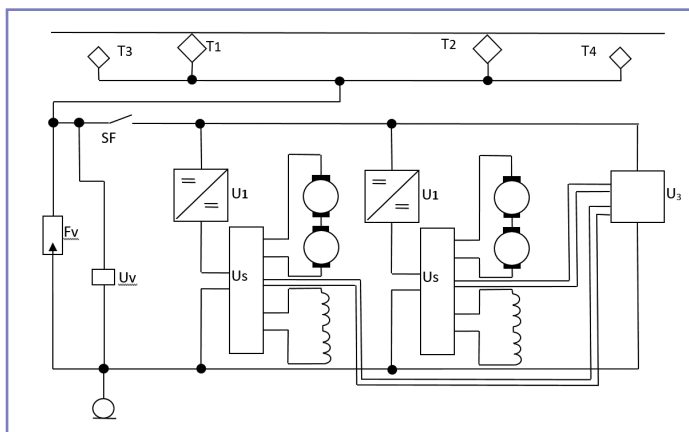


Рис. 4. Схема силовых цепей (упрощенная) модернизированного электровоза EL2

величину пускового тока в зависимости от населенности моторных вагонов, внедрена новая электронная система управления отоплением и др. В отличие от поезда ЭР2И, на ЭР12 была применена новая конструкция тиристорно-импульсного преобразователя (ТИП) с таблеточными вентилями и естественным охлаждением [5, 6], которая позволяла регулировать не только напряжение, но и ток возбуждения тяговых двигателей. Номинальная составность поезда ЭР12 – 10 вагонов: два головных, пять моторных и три прицепных. Конструкционная скорость – 130 км/ч, расчетная техническая на трехкилометровом перегоне – 70,0 км/ч. Ускорение груженого поезда в пусковой период благодаря применению авторежима повышено до 0,7 м/с².

Характерная особенность силовой схемы моторного вагона электропоезда ЭР12 (рис. 5) – использование двух параллельных групп тяговых двигателей.

Это позволило получить определенные преимущества по сравнению со схемами последовательного или последовательно-параллельного соединения двигателей при пуске. Двухфазный тиристорно-импульсный преобразователь (ТИП-1320/ЭУ-1) каждого моторного вагона обеспечивает регулирование напряжения на тяговых двигателях и тока возбуждения в двух параллельных ветвях, имеющих по два последовательных тяговых двигателя (М1–М2, М3–М4). К третьему типу модернизации относятся системы без принципиальных изменений силовой схемы и системы управления, однако улучшающие ряд характеристик ЭПС, например, введение плавного регулирования скорости.

В настоящее время на новых типах электропоездов, таких как ЭП2Д, в качестве источника питания бортовых цепей

и устройства заряда аккумуляторных батарей используются статические преобразователи собственных нужд (ПСН). Преобразователь можно использовать для повышения энергоэффективности электропоездов, внося минимальные изменения в силовую схему электропоезда. Смысл предложения состоит в том, что преобразователь собственных нужд имеет достаточно высокую перегрузочную способность. Это позволяет осуществить плавное трогание электропоезда с места, движение с низкой скоростью и маневровые перестановки. Данная система не требует существенных материальных затрат, продлит ресурс работы силовых контакторов и тяговых электродвигателей, не создаст дополнительных помех в контактной сети.

В преобразователях собственных нужд электропоездов использованы транзисторы IGBT с допустимым током 100–200 А, при этом их мощность составляет 100–120 кВт. Таким образом, даже при минимально допустимом напряжении контактной сети 2200 В мощность ПСН составляет

$$P = U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{VT}} \cdot \eta \cdot K_p, \quad (1)$$

где P – предельная выходная мощность преобразователя;

$U_{\text{вх}}$ – минимальное входное напряжение;

I_{VT} – предельный паспортный ток транзистора, 100 А;

η – КПД преобразователя полной нагрузки, принимаем 0,85;

K_p – кратность входного тока инвертора и тока одного прибора, принимаем равной 2.

Таким образом, полупроводниковые приборы ПСН обеспечат выходную мощность

$$P = 2200 \cdot 100 \cdot 0,85 \cdot 2 = 374 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 374 \text{ кВт}.$$

Изначально в номинальную мощность ПСН заложена мощность, необходимая для возбуждения тяговых электродвигателей в режиме электрического торможения.

Эта мощность различается на различных сериях ЭПС. Вычислить мощность, требуемую для возбуждения, можно из предельного тока возбуждения при торможении и сопротивления обмоток возбуждения двигателей электропоездов с электрическим торможением

$$P = 4 \cdot \frac{(I_{\text{Вmax}} \cdot R_{\text{об}} \cdot K_{\text{ПБ}} + 2 \cdot \Delta U_{\text{VS}}) \cdot I_{\text{Вmax}}}{\eta_{\text{ТРВ}}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{Вmax}}$ – максимальный ток возбуждения в эксплуатации;

$R_{\text{об}}$ – омическое (активное) сопротивление обмоток возбуждения;

$K_{\text{ПБ}}$ – коэффициент дополнительного падения напряжения в силовых цепях и в тормозном переключателе (принимается 1,2);

ΔU_{VS} – падение напряжения на тиристорах управляемого выпрямителя;

$\eta_{\text{ТРВ}}$ – КПД трансформатора возбуждения.

Так, для электропоезда ЭР2Т данная мощность составляет

$$P = 4 \cdot \frac{(200 \cdot 0,1 \cdot 1,2 + 2 \cdot 1,45) \cdot 200}{0,96} = 22416 \text{ Вт} = 22,4 \text{ кВт}.$$

Максимальный ток возбуждения для различных типов тяговых двигателей и серий электропоездов различается.

Параметры тяговых электродвигателей различных серий электропоездов сведены в таблицу 1.

Из эксплуатирующихся в настоящее время на железных дорогах России наиболее целесообразна модернизация электропоездов ЭД4М, ЭТ2М и выпускаемых в настоящее время электропоездов ЭП2д, так как на них штатно установлен ПСН 110, а срок службы поездов этих серий составляет более 30 лет.

Мощность, потребляемая из контактной сети при пуске электропоезда, и мощность, развиваемая тяговыми двигателями в этот момент, может быть определена исходя из тяговых [7, 8] и токовых характеристик электропоездов.

Мощность, потребляемая из контактной сети (на одну электросекцию), определяется как

$$P_{\text{кc}} = U_{\text{кc}} \cdot I_3, \quad (3)$$

где $U_{\text{кc}}$ – напряжение в контактной сети, 3000 В;

I_3 – ток моторного вагона электросекции из токовых характеристик.

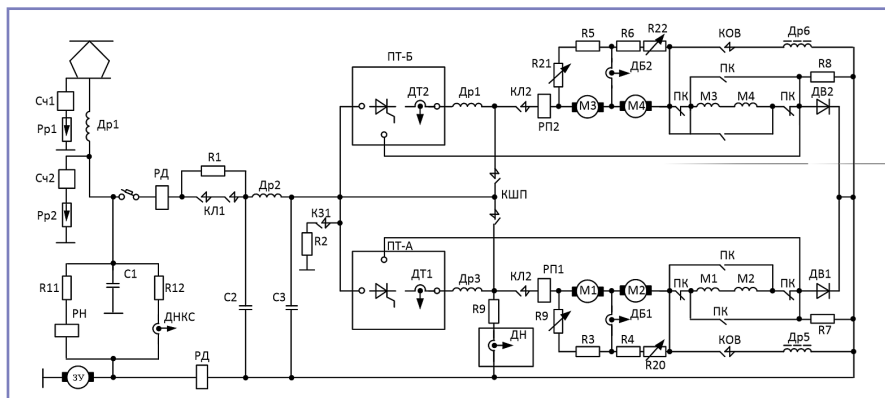


Рис. 5. Принципиальная силовая схема электропоезда с импульсным регулированием ЭР12

Таблица 1. Характеристики тяговых электродвигателей

Параметры	Тип тягового двигателя			
	УРТ 110 (ЭР2)	1ДТ.003 (ЭР2Т)	ТЭД 2У1 ЭТ2м, ЭД4м	1ДТ.17КУ1 ЭП2д, ЭТ2ЭМ
Номинальный режим работы	S2	S2	S2	S2
Номинальное напряжение, В	1500	750	750	1500
Мощность, кВт	200	240	235	250
Часовой ток двигателя, А	146	350	345	184
Максимальный (пусковой) ток двигателя, А	175	410/475	410	275
Максимальный ток обмотки возбуждения в режиме торможения, А	–	230	210	150
КПД номинального режима, %	89	92	91,5	90,6
Сопротивление обмоток якоря, Ом	0,164	0,05	0,06	0,15
Сопротивление обмоток дополнительных полюсов, Ом	0,07		0,02	0,09
Сопротивление обмоток возбуждения, Ом	0,182	0,1	0,1	0,3
Тип ПСН	Электро-машинный ДК604	Электро-машинный 1ПВ.6	Электро-машинный НВП 44/38	Статический ПСН-110
Мощность ПСН, кВт	12/5	36	38	110
Доступная мощность ПСН для ПВ 10%, кВт	–	36	40	374
Возможность модернизации	Нет	Есть, малоэффективно	Есть, при замене на ПСН 110	Есть

Чтобы определить электрическую мощность, затрачиваемую на питание тяговых двигателей в процессе пуска, необходимо учесть падение напряжения в пусковых реостатах, для чего выделить падение напряжения на обмотках и ЭДС вращения

$$P_{\text{дв.эл}} = n_{\text{д}} I_{\text{д}} (U_{\text{д}} + \Delta U), \quad (4)$$

где $n_{\text{д}}$ – количество тяговых двигателей на моторном вагоне;

$I_{\text{д}}$ – ток тягового двигателя;

$U_{\text{д}}$ – напряжение на двигателе;

ΔU – падение напряжения в коллекторно-щеточном узле.

Напряжение на выводах двигателя складывается из ЭДС вращения, падения напряжения в обмотках и падения под щетками, принимаемым на уровне 2–3 В:

$$U_{\text{д}} = E + I_{\text{д}} (r_{\text{я}} + r_{\text{ов}}), \quad (5)$$

где E – ЭДС вращения;

$I_{\text{д}}$ – ток двигателя;

$r_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря (состоит из сопротивления якорной обмотки, обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки, при ее наличии).

$$E = C_v \cdot \Phi \cdot v, \quad (6)$$

где C_v – скоростной коэффициент;

Φ – магнитный поток;

v – скорость движения, км/ч.

Подводимая к двигателю электрическая мощность определяется по формуле:

$$P_{\text{дв.эл}} = n_{\text{д}} I_{\text{д}} (C_v \Phi \cdot v + I_{\text{д}} (r_{\text{я}} + r_{\text{ов}}) + \Delta U). \quad (7)$$

Данная зависимость представлена на рис. 6 вместе с токовыми характеристиками секции электропоезда типа ЭР2Т.

Токовые характеристики секции электропоезда с реостатным пуском построены для пуска с максимальной уставкой блока реле ускорения (БРУ-7) по току (400 А), соответствующей среднему току 405 А, для четырех ступеней ослабления возбуждения,

соответствующих четырем позициям контроллера машиниста. Точка пересечения кривой мощности, подводимой к тяговым двигателям, и линии мощности ПСН показывает возможность разгона до скорости приблизительно 7 км/ч с уставкой 400 А в случае, если ПСН обеспечит требуемое напряжение на выводах тягового электродвигателя. Величину напряжения можно определить по следующей формуле:

$$U_{\text{дв.подв}} = n_{\text{д.посл}} (C_v \Phi \cdot v + I_{\text{д}} (r_{\text{я}} + r_{\text{ов}}) + \Delta U), \quad (8)$$

где $U_{\text{дв.подв}}$ – максимальное напряжение, которое необходимо подвести к двигателю для разгона с током 400–405 А до скорости 7 км/ч;

C_v – скоростной коэффициент;

Φ – магнитный поток (определяется по кривой намагничивания);

$n_{\text{д.посл}}$ – число последовательно включенных тяговых двигателей.

Для скорости 7 км/ч и пускового тока 405 А напряжение на тяговых двигателях

$$U_{\text{дв.подв}(7)} = 4(18,9 \cdot 7 + 405(0,1 + 0,05) + 2) = 780,2 \text{ В.}$$

Для скорости 5 км/ч и пускового тока 405 А данное напряжение составляет

$$U_{\text{дв.подв}(5)} = 4(18,9 \cdot 5 + 405(0,1 + 0,05) + 2) = 629 \text{ В.}$$

Для трогания с места с током 405 А к двигателям необходимо приложить напряжение

$$U_{\text{дв.подв}(0)} = 4(405(0,1 + 0,05) + 2) = 251 \text{ В.}$$

Таким образом, для трогания с места к двигателям требуется приложить напряжение 251 В, а для достижения скорости 7 км/ч с этим же током необходимо увеличить напряжение до 780 В. Для

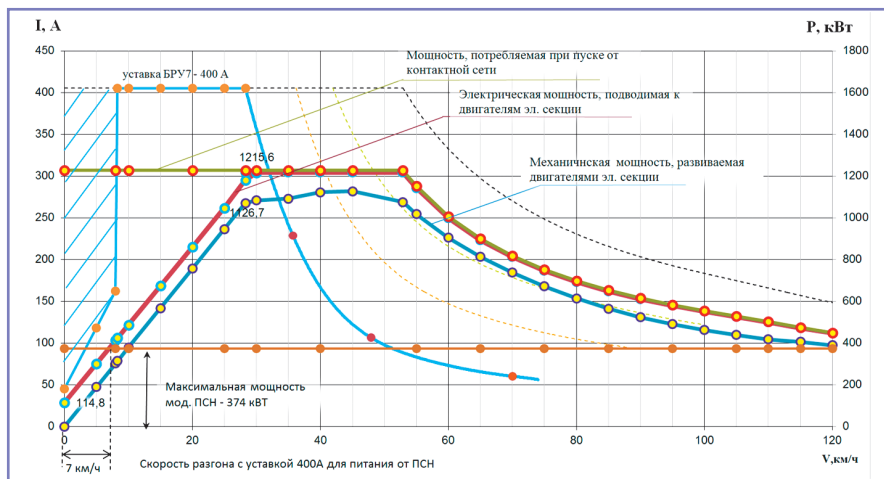


Рис. 6. Токовые характеристики и развиваемая мощность при разгоне электропоезда

движения с меньшими уставками тока необходимо, соответственно, меньшее напряжение. Исходя из предельной мощности ПСН, в момент перехода на реостатный пуск скорость перехода составляет 7–8 км/ч.

Ток, потребляемый из контактной сети до перехода составляет 165 А, после

перехода – 405 А. На рис. 6 синим цветом обозначена токовая характеристика электросекции при питании тяговых двигателей от ПСН. Зона работы питания тяговых двигателей от ПСН обозначена штриховкой синего цвета.

Одним из вариантов схемотехнического решения для обеспечения

движения электропоезда с малой скоростью, трогания с места и маневрового режима является схема с питанием цепей ТЭД от вторичной обмотки трансформатора ПСН с использованием управляемого выпрямителя.

Упрощенная силовая схема включения ПСН для питания тяговых электродвигателей приведена на рис. 7.

При трогании с места питание тяговых двигателей (ТЭД) осуществляется от управляемого выпрямителя, подключенного к специальной вторичной обмотке понижающего трансформатора ПСН. В момент подключения ТЭД включается контактор $K_{ПЧ}$ и до скорости 7–10 км/ч осуществляется питание через управляемый выпрямитель (VS1, VS2, VD1, VD2), который плавно повышает напряжение. В момент достижения максимального напряжения и мощности ПСН включается линейный контактор ЛК, и дальнейший пуск осуществляется путем выведения ступеней сопротивлений пускового реостата $R_{П1} - R_{ПN}$. При этом диоды $VD_{31} - VD_{3N}$ предотвращают попадание высокого напряжения в схему выпрямителя, не допуская его повреждения. Схема позволяет поддерживать скорость движения на участках, где она ограничена значениями 5–15 км/ч, без множественных повторных подключений тяговых двигателей к контактной сети и перегрева пусковых сопротивлений. Тяговые характеристики с питанием тяговых двигателей от ПСН приведены на рис. 8. На характеристики нанесена линия сопротивления движению на площадке.

Из тяговых характеристик видно, что при питании тяговых двигателей от ПСН силы тяги достаточно для трогания с места и разгона до скорости 15–17 км/ч на подъеме 10°_{00} .

Затраты на модернизацию, которые можно оценить исходя из стоимости заключаемых контрактов на оборудование ЭПС, представлены в таблице 2.

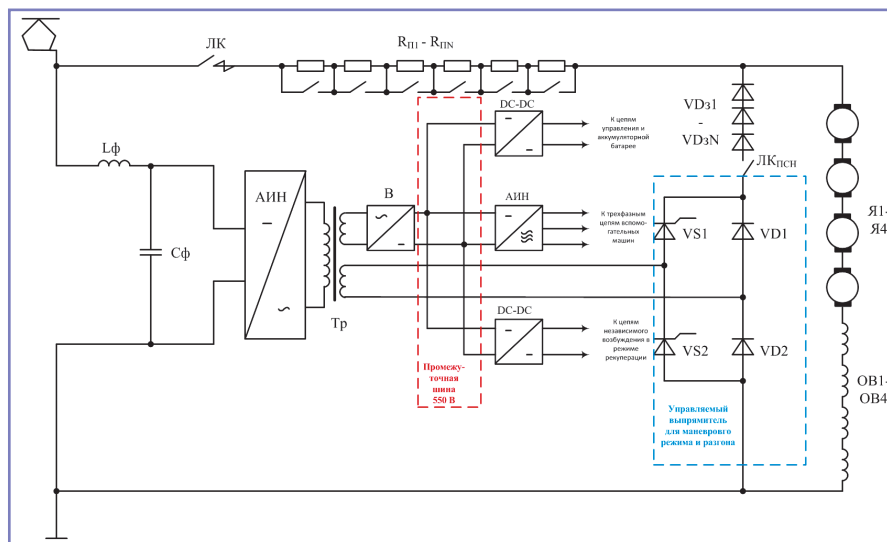


Рис. 7. Схема включения понижающего трансформатора ПСН в электрические цепи электропоезда типа ЭР2Т в режиме тяги малой скорости

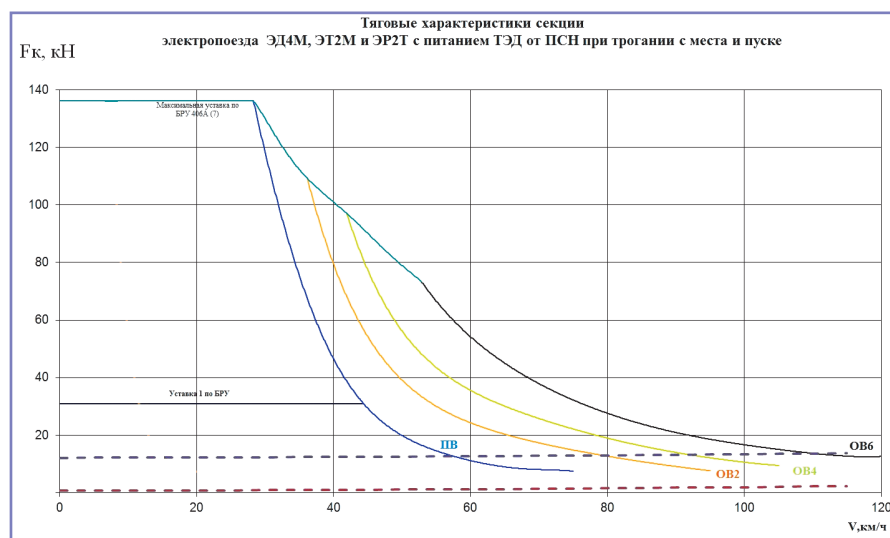


Рис. 8. Тяговые характеристики секции электропоезда типа ЭР2Т (ЭТ2М, ЭД4М) с линиями сопротивления движению (штриховые) на площадке и подъеме 10°_{00}

Таблица 2. Эффективность модернизации ЭПС с двигателями постоянного тока

Показатели	Затраты на модернизацию, долл. США/кВт	Повышение энергоэффективности, %	Необходимость существенных изменений конструкции ЭПС
По первому варианту: глубокая модернизация с заменой привода на асинхронный	400–600	До 10–12%	Да
По второму направлению: установка импульсных тяговых преобразователей. Использование ПСН	200–300 До 100	7–8% До 5%	Да Нет
По третьему варианту: электронное ослабление возбуждения	–	0–1%	Нет

Выводы

1. Глубокая модернизация ЭПС по первому и второму вариантам по стоимости сопоставима с приобретением нового подвижного состава. В то же время она дает наибольший эффект с точки зрения повышения энергоэффективности.

2. Применение ПСН для трогания электропоезда с места и движения ЭПС с низкой скоростью является компромиссным вариантом, позволяющим при небольших затратах обеспечить увеличение энергоэффективности до 5% без существенных изменений в конструкции электропоезда.

Литература

1. Цукало П.В. Экономия электроэнергии на моторвагонном подвижном составе [Текст] / П.В. Цукало. – М.: Транспорт, 1975. – 72 с.
2. Цукало П.В. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р [Текст] / П.В. Цукало, Н.Г. Ерошкин. – М.: Транспорт, 1986. – 359 с.
3. Мазнев А.С., Евстафьев А.М., Петров В.Б., Дементьева М.В. Энергосберегающее оборудование электропоездов // Локомотив, 2007, № 1(601).
4. Railway Gazette International, 2011, № 7, p. 8.
5. Дымант Ю.Н. Электропоезда ЭР12 с импульсным регулированием тяги / Ю.Н. Дымант, З.М. Рубчинский, Н.В. Таран, О.Г. Ча-

усов // Электрическая и тепловозная тяга, 1978, № 12, с. 40–43.

6. Рубчинский З.М. Результаты тягово-энергетических испытаний электропоезда ЭР12 [Текст] / З.М. Рубчинский, Е.И. Калинин, Н.В. Таран и др. // Электрическая и тепловозная тяга, 1980, № 4, с. 39–40.

7. Мазнев А.С. Электрические аппараты и цепи подвижного состава [Текст]: учебное пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / А.С. Мазнев, О.И. Шатнев. – М.: Академия, 2008. – 272 с.

8. Солодунов А.М. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / А.М. Солодунов, Ю.М. Иньков, Г.Н. Коваливкер, В.В. Литовченко. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.

Евстафьева Марина Валерьевна

Родилась в 1988 году. В 2011 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 10 научных трудов.

Изварин Михаил Юльевич

Родился в 1964 году. В 1987 году окончил ЛИИЖТ по специальности «Электрификация

железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Преобразователь для питания бортовых цепей электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 46 научных трудов.

Evstafieva Marina

Was born in 1988. In 2011 she graduated from St. Petersburg State University of Railway Engineering with a degree in "Organization of transportation and management of railway transport". Work experience is 13 years. At present she is an assistant at the Electric traction department of PGUPS. She has more than 10 scientific papers.

Izvarin Mikhail

Was born in 1964. In 1987 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in "Electrification of railway". He is candidate of technical sciences, associated professor. In 1998 he defended the dissertation with topic "Conversion device for power supply of on-board circuits of electric trains of direct current". He has 29 years of work experience. At present he works as associate professor at the Electric traction department of PGUPS. He has 46 scientific papers.

Применение накопителей энергии – ионисторов (суперконденсаторов) на электропоездах метрополитена

// The use of energy storage – ionistors (supercapacitors) on electric trains of metro //

Афанасьев М. М., Клоков Д. В.,
ГУП «Московский метрополитен», Москва

Иньков Ю. М., д.т.н., профессор,
РУТ (МИИТ), Москва

В статье рассматривается проблема энергосбережения на московском городском электротранспорте, самым мощным потребителем электроэнергии из которых остается метрополитен. Одним из способов энергосбережения является использование суперконденсаторов в качестве накопителей для приема энергии при рекуперативном торможении электропоезда. Проведен расчет накопителей энергии для вагона метрополитена модели 81–765. Рассмотрены преимущества и недостатки установки накопителей энергии на вагон по сравнению с тяговой подстанцией.

Ключевые слова: энергосбережение, электроэнергия, накопители энергии, суперконденсаторы, тяга поездов, рекуперативное торможение, электроподвижной состав, мощность, емкость.

В последние годы значительно возросло потребление электроэнергии на транспорте. При этом стремительно растет энергопотребление ГУП «Московский метрополитен», которое является одним из самых мощных потребителей электроэнергии в городе. За сутки Московский метрополитен перевозит около 10 млн человек, потребляя свыше 1,9 млрд кВт·ч электроэнергии в год.

В настоящее время актуальной становится задача обеспечения эффективного энергосбережения на электрифицированном городском транспорте, особенно на метрополитене. На Московском метрополитене около 75% потребляемой электроэнергии расходуется на тягу поездов. Именно поэтому задача энергосбережения на железнодорожном транспорте и метрополитене эффективнее всего решается посредством уменьшения расхода электроэнергии на тягу поездов. Наибольший эффект энергосбережения на электроподвижном составе метрополитена

The article deals with the problem of energy saving on the Moscow urban electric transport, the most powerful consumer of electric power of which is the metro. One way of energy saving is to use supercapacitors as energy storages for receiving energy during regenerative braking of an electric train. The calculation of energy storages for the car of metro model 81–765. The advantages and disadvantages of installing energy storages on the car compared to the traction substation are considered.

Keywords: energy saving, electric power, energy storages, supercapacitors, train traction, regenerative braking, electric stock, power, capacity.

дает использование режимов рекуперативного торможения. По последним данным, в 2019 году в вагонном парке ГУП «Московский метрополитен» насчитывалось 6143 вагона, в этом числе вагонов серии 81-717/714, Еж3 и Ем508Т – 2807 шт.

(46,7%); вагонов серии 81-720/721 «Яуза» – 81 шт. (1,32%); вагонов серии 81-740/741 «Русич» – 730 шт. (11,9%); вагонов серии 81-760/761 «Ока» – 1312 шт. (21,4%); вагонов серии 81-765/766/767 «Москва» – 1146 шт. (18,7%). Но только электропоезда типа «Русич», «Ока» и «Москва» в количестве 3188 шт. (51,9%) оборудованы системами рекуперативного торможения. В будущем доля нового подвижного состава будет увеличиваться в связи с интенсивным развитием метрополитена. Применение рекуперации позволяет получить экономию свыше 10–15% от энергии, расходуемой на тягу поездов [1]. Однако реализовать потенциально более высокую отдачу энергии рекуперации от электроподвижного состава в тяговую сеть только за счет межпоездного обмена невозможно, так как во время торможения данного поезда на фидерной зоне не всегда может находиться поезд, идущий в режиме тяги и способный принять энергию торможения.

Существует два способа решения этой проблемы, заключающихся в использовании накопителей энергии для приема энергии рекуперации, которые размещают на тяговых подстанциях [2] и непосредственно на подвижном составе. Наибольший эффект при этом достигается при использовании в качестве



Рис. 1. Диаграмма Рагона для различных накопителей электрической энергии

накопителей энергии ионисторов или суперконденсаторов.

Ионисторы (суперконденсаторы) являются электрохимическими устройствами. В отличие от других типов конденсаторов и аккумуляторных батарей, ионисторы обладают более высокой удельной мощностью. Для сравнения накопителей энергии удобно использовать диаграмму Рагоне (англ. *Ragone plot* [3]), представленную на рис. 1.

На данной диаграмме по оси ординат откладывается удельная запасаемая энергия в накопителе или ячейке, а по оси абсцисс – плотность мощности. Наклонные параллельные прямые показывают, какое время необходимо для полного заряда и разряда накопителя энергии. Из диаграммы видно, что высокой плотностью мощности обладают алюминиевые электролитические конденсаторы, однако они имеют низкую удельную запасаемую энергию. Аккумуляторы по сравнению с алюминиевыми конденсаторами имеют большее значение запасенной энергии, но меньшее значение плотности мощности. Очевидно, что суперконденсаторы обладают рациональным соотношением запасенной энергии, мощности и времени для заряда и разряда накопителей энергии.

При использовании накопителей энергии в режиме рекуперативного торможения энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, аккумулируется в накопителе и повторно используется в режиме тяги, при этом электропоезд не потребляет электроэнергию от контактной сети (третьего рельса).

Для расчета накопителей энергии, устанавливаемых на вагонах метрополитена, необходимо вычислить энергию вагона, вырабатываемую в процессе рекуперативного торможения. Для примера расчетов будем использовать вагон метрополитена модели 81-765 [4].

Энергия, вырабатываемая при рекуперативном торможении:

$$W_{\text{рек}} = W_{\text{кин}} \cdot k_3 = \frac{m_{\text{в}} \cdot V_{\text{н}}^2}{2} \cdot k_3, \quad (1)$$

где $W_{\text{кин}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot V_{\text{н}}^2}{2}$ – кинетическая энергия вагона;

k_3 – коэффициент возврата электроэнергии в сеть при рекуперативном торможении, равный отношению энергии, возвращенной вагоном в сеть при рекуперации, к кинетической энергии вагона в момент начала торможения при условии полного приема рекуперированной энергии, $k_3 \approx 0,35$;

Таблица 1. Технические параметры суперконденсатора марки LSUM 048R6C0166F EA DC

Наименование	Значение параметра
Емкость, Ф	166
Номинальное напряжение, В	48,6
Сопротивление, МОм	5
Максимальный продолжительный ток (при $t = 40^\circ\text{C}$), А	150
Удельный запас энергии, Вт·ч/кг	3,8
Вес, кг	14,2
Рабочая температура, $^\circ\text{C}$	$-40 \sim +60$
Геометрические размеры (длина, ширина, высота), мм	418 x 194 x 175,4

$m_{\text{в}}$ – масса вагона (тара) с учетом загрузки вагона пассажирами, т.

$$m_{\text{в}} = m_{\text{г}} + m_{\text{пас}} \cdot \Pi_{\text{г}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{г}}$ – масса головного вагона, $m_{\text{г}} = 38$ т;

$m_{\text{пас}}$ – средняя масса пассажира, $m_{\text{пас}} = 70$ кг;

$\Pi_{\text{г}}$ – максимальная вместимость головного вагона из расчета 10 чел/м², $\Pi_{\text{г}} = 315$ пас.;

$$m_{\text{в}} = 38 + 0,07 \cdot 315 = 60,05 \text{ т};$$

$V_{\text{н}}$ – начальная скорость в момент торможения, $V_{\text{н}} = 80$ км/ч = 22,222 м/с.

Для вагона выбранного типа получим:

$$W_{\text{рек}} = \frac{60050 \cdot 22,222^2}{2} \cdot 0,35 = 5,189 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

В качестве накопителя энергии использован суперконденсатор марки LSUM 048R6C0166F EA DC компании «LS Mtron», технические параметры которого приведены в таблице 1 [5].

Запасенная энергия одного модуля:

$$W_{\text{зап1}} = \frac{C \cdot U_0^2}{2}, \quad (3)$$

где C – емкость одного модуля, Ф;

U_0 – номинальное напряжение, В.

$$W_{\text{зап1}} = \frac{166 \cdot 48,6^2}{2} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Количество модулей, необходимых для последовательного включения, чтобы

обеспечить необходимое напряжение:

$$n = \frac{U_{\text{max}}}{U_0}, \quad (4)$$

где U_{max} – максимальное напряжение на токоприемнике вагона, $U_{\text{max}} = 975$ В.

После подстановки получим:

$$n = \frac{975}{48,6} \approx 20 \text{ шт.}$$

Суперконденсатор марки LSUM 048R6C0166F EA DC состоит из 18 последовательно соединенных конденсаторных ячеек номинальным напряжением 2,7 В. Однако при напряжении 2,7 В на конденсаторной ячейке срок службы ее составляет менее одного года. Зависимость напряжения на конденсаторной ячейке от срока службы показана на рис. 2. Для повышения срока службы накопителя энергии до 10 лет необходимо, чтобы напряжение на одной ячейке не превышало 2,2 В. Таким образом, требуется 25 модулей, соединенных последовательно, вместо 20.

Однако использования 25 суперконденсаторов, соединенных последовательно, недостаточно. Необходимо определить, сколько будет параллельных цепей таких суперконденсаторов.

Как известно, энергия в конденсаторе выражается:

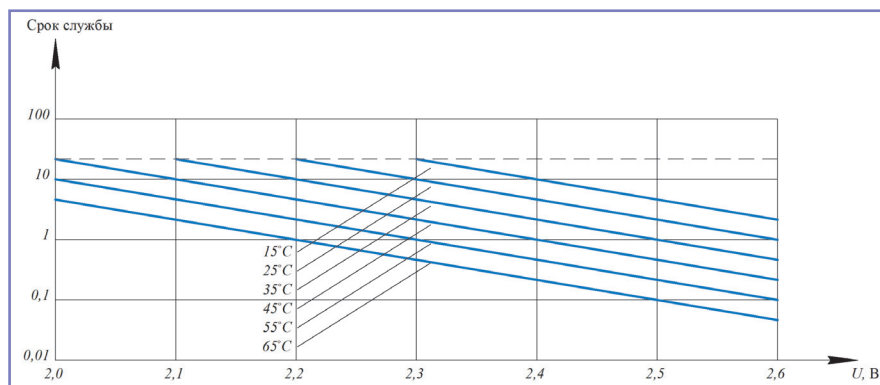


Рис. 2. Срок службы суперконденсатора в зависимости от температуры и напряжения на конденсаторной ячейке

$$W = \frac{C_{\Sigma} \cdot U_{\text{кк}}^2}{2}, \quad (5)$$

где C_{Σ} – суммарная емкость всех суперконденсаторов, Ф.

$$C_{\Sigma} = C_0 \cdot \frac{m}{n}, \quad (6)$$

где C_0 – емкость одного модуля, Ф.
 m – число параллельных ветвей.

После подстановки получим:

$$W = \frac{C_0 \cdot m \cdot U_{\text{кк}}^2}{2 \cdot n}. \quad (7)$$

Число параллельных ветвей равно:

$$m = \frac{2 \cdot W \cdot n}{C_0 \cdot U_{\text{кк}}^2}. \quad (8)$$

$$m = \frac{2 \cdot 5,189 \cdot 10^6 \cdot 25}{166 \cdot 975^2} = 1,644 \approx 2.$$

Таким образом, суперконденсаторы необходимо соединить в две параллельные цепи, по 25 модулей последовательно в каждой цепи. Общее количество суперконденсаторов в накопителе составит 50 штук. Осуществим расчет параметров одного накопителя.

Суммарная емкость накопителя энергии равна:

$$C_{\Sigma} = 166 \cdot \frac{2}{25} = 13,28 \text{ Ф.}$$

Запасенная энергия равна:

$$W_{\text{зап}} = \frac{13,28 \cdot 975^2}{2} = 6,312 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Как видно, запасенная энергия такого накопителя превышает кинетическую энергию вагона при торможении. То есть для того, чтобы энергия при рекуперации полностью запасалась в накопителе энергии, необходимо, чтобы накопитель состоял из 50 суперконденсаторов.

Таким образом, суммарная масса накопителя энергии равна:

$$m_{\Sigma} = m_m \cdot N_{\Sigma} \quad (9)$$

где m_m – масса одного суперконденсатора, кг.

$$m_{\Sigma} = 14,2 \cdot 50 = 710 \text{ кг.}$$

Суммарное сопротивление такого накопителя:

$$R_{\Sigma} = \frac{(n \cdot R_0)}{m}, \quad (10)$$

где R_0 – сопротивление одного модуля, Ом.

$$R_{\Sigma} = \frac{(25 \cdot 5 \cdot 10^{-3})}{2} = 6,25 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Установка накопителей энергии на вагоне по сравнению с установкой на тяговой подстанции имеет ряд преимуществ:

- на вагонах не требуются устройства передачи энергии от тягового электродвигателя к тяговой подстанции;

- исключаются потери энергии в сети при передаче ее от вагона к тяговой подстанции;

- нет ограничений по величине напряжения в контактном рельсе.

Недостатками вагонов с накопителями энергии являются увеличение массы и снижение пассажироместности. Последнее обусловлено необходимостью размещения вагонного оборудования, а именно накопителей энергии, внутри кузова вагона. Однако этот недостаток несущественный ввиду того, что в настоящее время появились электропоезда, в составе которых присутствуют вагоны с немоторными тележками. В этом случае навесное оборудование под вагоном практически отсутствует, а освобожденное пространство может быть использовано для размещения накопителей энергии, не затрагивая полезного объема внутри вагона.

В свою очередь, применение накопителей энергии позволит сократить потребление электроэнергии из контактной сети (контактного рельса) на 20–30% за счет повторного использования запасенной энергии в накопителе энергии, что дополнительно снизит нагрузку на тяговые подстанции и контактные сети.

С точки зрения энергоэффективности предлагаемое применение накопителей энергии на электропоездах Московского метрополитена позволит значительно сократить расход электроэнергии. В зависимости от условий эксплуатации расчетный срок окупаемости накопителей энергии составляет около 5 лет.

Таким образом, применение накопителей энергии на подвижном составе метрополитена является энергоэффективным и способствует повышению безопасности движения поездов.

Литература

1. Баранов Л.А., Бродский Ю.А., Гречишников В.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Оценка эффективности использования стационарных емкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения // Электротехника, 2010, № 1.
2. Шевлюгин М.В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии [текст]: дис. ... докт. техн. наук. – М.: МГУ ПС 2014.
3. Ragone D., Review of battery systems for electrically powered vehicles / SAE Technical Paper 680453, 1968, doi: 10.4271/680453.
4. Состав из вагонов метрополитена модели 81-765, 81-766, 81-767. Руководство по

эксплуатации. 7650.30.00.01; ОАО «Метровагонмаш».

5. Сайт компании "LS Mtron" // <http://www.lsmtron.com>.

Афанасьев Михаил Михайлович

Родился в 1994 году. В 2017 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает ведущим инженером отдела качества Вагоноремонтного комплекса ГУП «Московский метрополитен».

Клоков Дмитрий Вячеславович

Родился в 1995 году. В 2017 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает ведущим инженером-технологом производственно-технического отдела Вагоноремонтного комплекса ГУП «Московский метрополитен».

Иньков Юрий Моисеевич

Родился в 1937 году. В 1954 году окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер-электромеханик путей сообщения». Доктор технических наук, профессор. В 1978 году защитил диссертацию по теме «Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей электроэнергии». Опыт работы – 60 лет. В настоящее время – профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ). Имеет более 200 научных трудов, в том числе монографии, и более 150 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки РФ, имеет 5 государственных наград, знаки «Почетный работник транспорта России» и «Почетный железнодорожник».

Afanasyev Mihail

Was born in 1994. In 2017 he graduated from MGUPS (MIIT) on the topic "Electric railroad communications". Work experience is 3 years. At present he works as a senior engineer at Quality Department of the Car Repair Complex of the State Unitary Enterprise "Moscow Metro".

Klockov Dmitriy

Was born in 1995. In 2017 he graduated from MGUPS (MIIT) with a degree in Electric Rail Transport. Work experience is 3 years. At present he works as a leading engineer-technologist of the production and technical department of the Car Repair Complex of the State Unitary Enterprise "Moscow Metro".

In'kov Yuriy

Was born in 1937. In 1954 he graduated from Moscow Institute of Railway Transport Engineers, speciality is "Railway transport engineer-electrician". He is a doctor of engineering, a professor. In 1978 he defended a thesis the theme is "Probabilistic computing methods of power semiconductor converters". He has 60 year work experience. At present he works as a professor of Trains and locomotives department of Russian University of Transport. He has more than 200 scientific works, including monographs and more than 150 author's certificates and patents. He is a honored scientist of Russia, he has 5 state awards, honored transport worker of Russia and honored railway worker signs.

Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 1

// Modeling of work processes hybrid drive power on the physical model. Part 1 //

Незевак В. Л., к.т.н., доцент,

Плотников Ю. В., Шатохин А. П., к.т.н.,
ОмГУПС, Омск

В статье рассмотрены результаты моделирования процессов работы гибридного накопителя электроэнергии. Рассмотрена физическая модель системы тягового электроснабжения, включающая модели тяговой подстанции, тяговой сети и электроподвижного состава. Рассмотрен состав элементов физической модели, приведено описание ее работы. Результаты моделирования показаны для четырех вариантов работы системы тягового электроснабжения с накопителем электроэнергии на шинах поста секционирования. Для заданных параметров гибридного накопителя получены результаты моделирования, позволяющие в дальнейшем выполнять оценку эффективности работы гибридного накопителя с электротяговой нагрузкой в различных режимах, в зависимости от соотношения энергоемкости модулей и заданного уровня выравнивания графика нагрузки и стабилизации напряжения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, пост секционирования, гибридный накопитель электроэнергии, физическая модель, режимы заряда и разряда, аккумуляторная батарея, суперконденсатор, стабилизация напряжения, выравнивание графика электрической нагрузки.

Системы накопления электроэнергии находят широкое применение в электроэнергетике и на транспорте для реализации функций резервирования, обеспечения эффективной работы возобновляемых источников энергии, электропривода в автомобилях и повышения эффективности городского и пригородного электротранспорта как в России [1–5], так и за рубежом [6–8]. Для построения систем накопления рассматриваются накопители электроэнергии,

The article describes the results of modeling the processes of hybrid power storage. Physical model of traction power supply system including models of traction substation, traction network and electric rolling stock is considered. The composition of the elements of the physical model is considered, the description of its work is given. The simulation results are shown for four variants of the traction power supply system with a power storage device on the tines of the partition post. For given parameters of the hybrid drive simulation results obtained, allowing to evaluate the efficiency of the hybrid drive with electrotraction load in different modes depending on the ratio of power consumption modules and a specified level of alignment of the load curve, and voltage stabilization.

Keywords: traction power supply system, hybrid power storage, physical model, charge and discharge modes, battery module, supercapacitor, voltage stabilization, electric load graph alignment.

использующие различные виды энергии (электрохимические, кинетические, сжатого воздуха, гидроаккумулирующие и др.).

Известные виды накопителей электроэнергии обладают преимуществами и недостатками, определяющими область их применения. Выбор наиболее подходящего вида накопителей электроэнергии выполняется с учетом их удельных показателей относительно друг друга, как это представлено,

например, на диаграмме Рэйгона [9]. Так, если преимуществом суперконденсаторов перед другими видами является их высокая удельная мощность, то недостатком – низкая удельная энергоемкость, и наоборот – для электрохимических видов накопителей. Сочетание данных характеристик различных видов в одном устройстве, позволяющее добиться более высоких энергетических показателей, привело к появлению гибридных систем накопления. Они рассматриваются при проектировании систем оперативного постоянного тока на тяговых подстанциях холдинга «РЖД» для обеспечения стабилизации напряжения при операциях с коммутационными аппаратами [10]. Имеющиеся особенности электротяговой нагрузки обуславливают актуальность решения задачи по апробации работы гибридного накопителя в системе тягового электроснабжения. Для оценки работы гибридного накопителя в системе тягового электроснабжения в настоящей работе рассматриваются результаты моделирования на физической модели, использующей графики электротяговой нагрузки электроподвижного состава.

Электротяговая нагрузка обладает рядом особенностей, определяемых профилем участка [11], параметрами графика движения [12, 13], эксплуатируемыми сериями электроподвижного состава [14, 15] и условиями работы в системе тягового электроснабжения [16–18]. Указанные особенности учитываются при построении модели путем введения в модель графика электротяговой нагрузки поезда с локомотивом серии 2ЭС10 при следовании по одному из действующих участков.

Физическое моделирование позволяет оценить показатели работы накопителей электроэнергии в различных режимах, влияние уставок по напряжению для перехода в режим работы и т.д. Моделируемые характеристики работы

накопителя необходимы для оценки его энергоемкости, рабочих диапазонов токов и напряжения, настройки режимов и ресурса работы для заданных условий.

Описание предлагаемой модели

При построении физической модели за основу принята система тягового электроснабжения (СТЭ), состоящая из тяговой подстанции постоянного тока ТП, тяговой сети однопутного участка (контактной (к.с.) и рельсовой сетей) и поста секционирования (ПС) с размещенным на нем накопителем электроэнергии (НЭЭ) (рис. 1). В качестве электроподвижного состава используются две единицы – ЭПС1 и ЭПС2 с заданным графиком электротяговой нагрузки. Для целей моделирования принято, что ЭПС1 реализует только тяговый режим, а ЭПС2 – три режима (тяги, выбега и рекуперативного торможения). Схема замещения моделируемой системы

тягового электроснабжения приведена на рис. 2. В схеме замещения тяговая подстанция с преобразовательным агрегатом ПА представлена в виде источника постоянного напряжения с неуправляемым вентилем, тяговая сеть – в виде сопротивления $R_{тс}$. Расположение поста секционирования ПС с накопителем электроэнергии (НЭЭ) и электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2 соответствует приведенной схеме моделируемой системы (рис. 1). Расположение электроподвижного состава вблизи поста секционирования позволяет принять сопротивление тяговой сети от поста секционирования до моделей электроподвижного состава равным нулю.

Структурная схема физической модели, построенной в соответствии со схемой замещения (рис. 2), приведена на рис. 3. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения (1) применяется блок питания

Б-5–300S, неуправляемого вентиля – диод VS-20TQ045 (2). В схеме использованы резисторы (3) $R_{к.с.}$ (0,2 Ом) и вспомогательные сопротивления 0,1 Ом (4) и (5), обеспечивающие измерения тока и напряжения. Электроподвижной состав ЭПС1 представлен в виде активной нагрузки (6). Для регистрации электрических величин в схеме применяется цифровой самописец марки S-Recorder E (7), позволяющий выполнить измерение и регистрацию токов и напряжений моделируемой тяговой подстанции, электроподвижного состава, модулей накопителя электроэнергии и напряжений на шинах модулей накопителя и в контактной сети.

В схеме реализован гибридный накопитель электроэнергии, состоящий из модуля на базе Li-Ion аккумуляторных батарей (далее – АКБ) (8) и модуля (9) на базе суперконденсаторов (далее – СК). Электроподвижной состав ЭПС2,

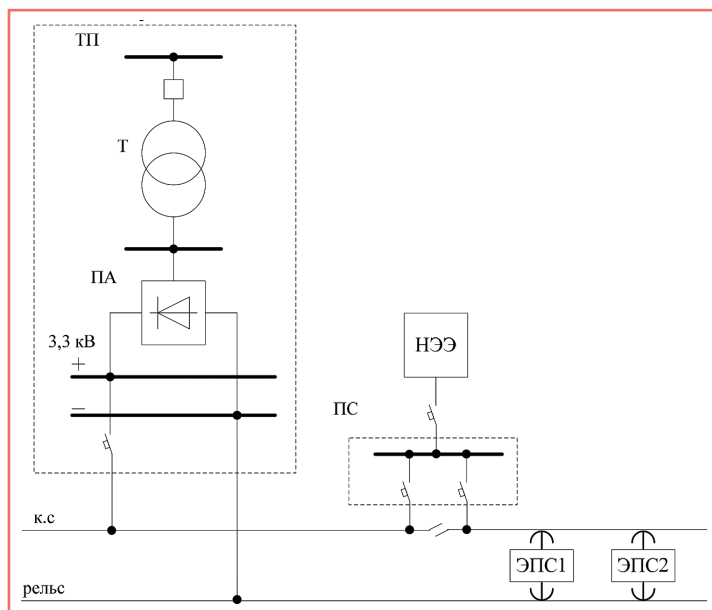


Рис. 1. Схема моделируемой системы тягового электроснабжения с электротяговой нагрузкой

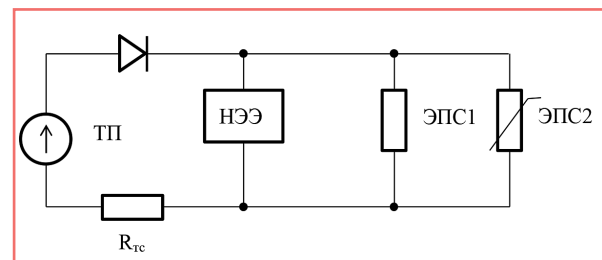


Рис. 2. Схема замещения, реализованная в физической модели

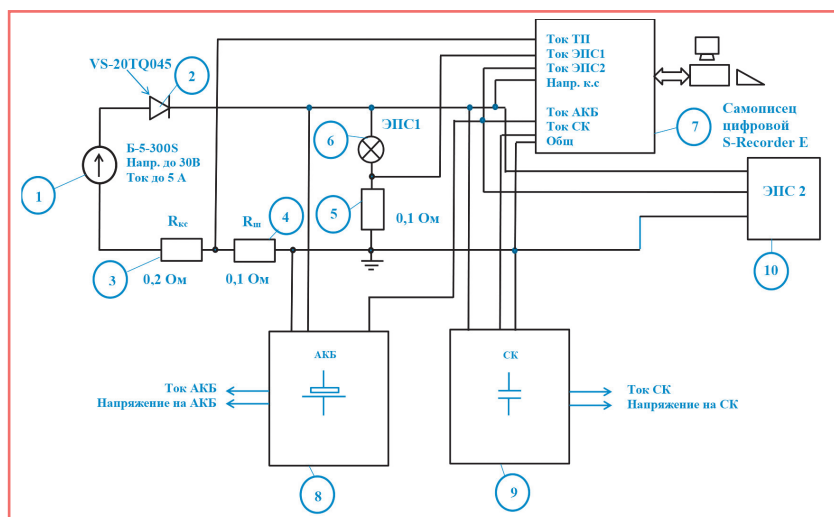


Рис. 3. Структурная схема физической модели системы тягового электроснабжения, электроподвижного состава и гибридного накопителя энергии

следующий попеременно в тяговом режиме, режиме выбега и рекуперативного торможения, представлен в виде блока (10), реализованного с помощью платы Arduino Uno.

Напряжение на блоке питания принято постоянным, а токи накопителя складываются из токов двух моделей – АКБ и СК:

$$\begin{cases} E_{\text{ТП}} = \text{const} \\ I_{\text{НЭЭ}} = I_{\text{АКБ}} + I_{\text{СК}} \\ I_{\text{ЭПС1}} = f(U_{\text{к.с}}) \\ I_{\text{ЭПС2}} = f(t) \\ I_{\text{ТП}} = I_{\text{ЭПС1}} + I_{\text{ЭПС2}} - I_{\text{НЭЭ}} \end{cases} \quad (1)$$

где $E_{\text{ТП}}$ – напряжение на шинах моделируемой подстанции ТП;

$I_{\text{НЭЭ}}, I_{\text{АКБ}}, I_{\text{СК}}$ – соответственно ток накопителя, модуля АКБ и СК;

$I_{\text{ЭПС1}}, I_{\text{ЭПС2}}$ – соответственно ток электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2;

$U_{\text{к.с}}$ – напряжение в контактной сети;

t – время моделирования.

Соответствующая структурной схеме физическая модель, состоящая из регулируемого блока питания (1), платы, включающей в себя диод (2) и резисторы (3) – (5), активное сопротивление (6), платы с батареей Li-Ion аккумуляторов (8), платы с батареей суперконденсаторов (9) и платы регулируемой нагрузки (10), приведена на рис. 4. Нумерация блоков сохранена и соответствует нумерации, использованной на структурной схеме (рис. 3).

Основные электрические параметры моделируемой системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава для физической модели приведены в таблице 1.

Уровень напряжения и тяговой нагрузки, принятый для моделирования работы гибридного накопителя электроэнергии, получен на основе данных измеренных значений напряжения и тяговой нагрузки с использованием коэффициента масштабирования $m = 400$. Электрические величины для элементов модели определены по формулам:

$$\begin{aligned} i_{\text{мод}} &= \frac{i}{m}; \quad u_{\text{мод}} = \frac{u}{m}; \\ p_{\text{мод}} &= i_{\text{мод}} \cdot u_{\text{мод}} = \frac{p}{m^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $i_{\text{мод}}, u_{\text{мод}}, p_{\text{мод}}$ – ток, напряжение и мощность источника питания и электроподвижного состава физической модели соответственно;

i, u, p – ток, напряжение и мощность, полученные по данным измерений

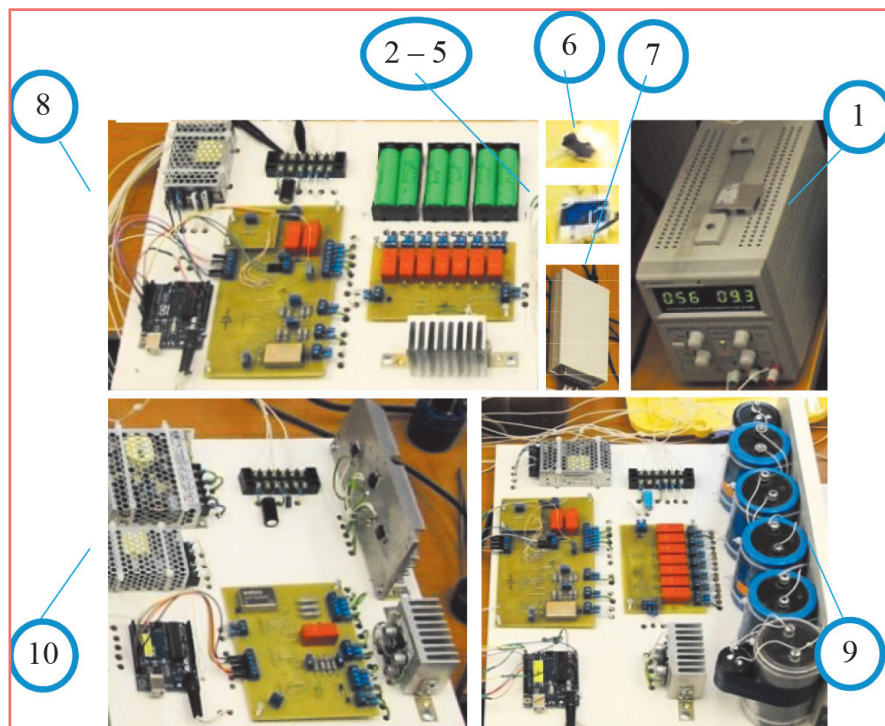


Рис. 4. Физическая модель системы тягового электроснабжения, электроподвижного состава и гибридного накопителя электроэнергии

электрических величин на тяговых подстанциях и электроподвижном составе соответственно.

Модель электроподвижного состава ЭПС2 использует график нагрузки, полученный по данным регистраторов параметра движения поезда для локомотива серии ЭС10, следующего в режиме тяги и рекуперативного торможения.

Структурная схема модели ЭПС2 включает в себя управляющий контроллер марки Arduino-Uno (2), позволяющий задавать произвольный график нагрузки и изменять режим работы путем подачи сигналов на плату управления (3) (рис. 5). Величина мощности, потребляемая в режиме тяги, изменяется с помощью управляемого резистора (5).

Таблица 1. Параметры физической модели

Параметр модели	Значение параметра
Тяговая подстанция	
Марка блока питания	Б-5-300S
Напряжение холостого хода, В	8,75
Максимальный ток, А	2,5
Выходное сопротивление, Ом	0,3
Технические характеристики АКБ	
Марка аккумулятора	Li-ion 18650
Емкость, мА·ч	2600 × 6 шт.
Номинальное напряжение, В	3,8
Технические характеристики СК	
Марка суперконденсатора	K50-35
Номинальное напряжение, В	10 (макс.); заряд до 5,4
Емкость, Ф	0,15 × 6 шт.
Электроподвижной состав	
Марка регулируемого источника тока	Arduino Uno
Ток, А	2,5
Напряжение, В	10
Мощность, Вт	25

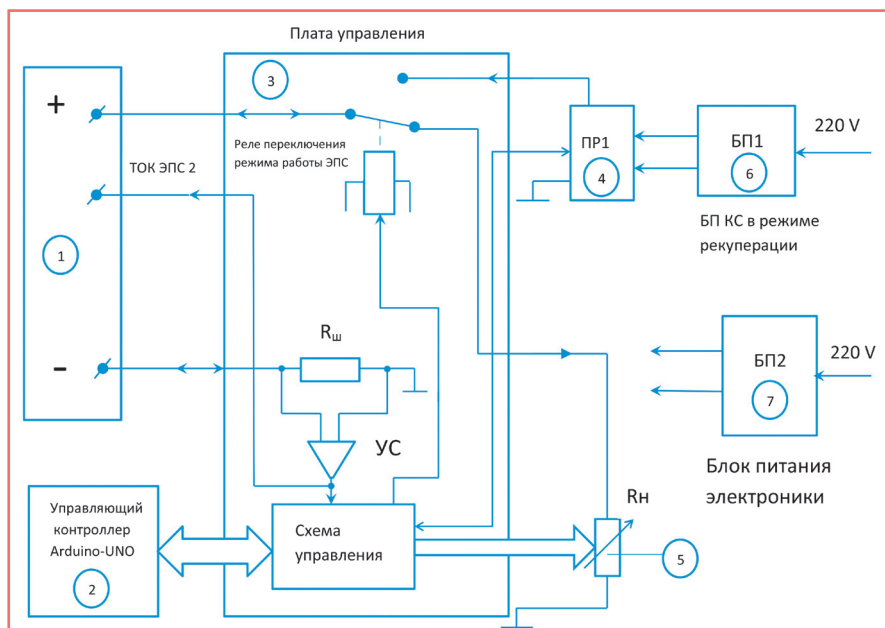


Рис. 5. Структурная схема модели электроподвижного состава

Моделирование процесса рекуперативного торможения в модели выполнено путем подключения дополнительного блока питания (6) через преобразователь напряжения (4) посредством электромагнитного реле в составе платы управления. Модель электроваза подключается к модели контактной сети через клеммную коробку схемы (1) (рис. 5). Питание электроники управления осуществляется от блока питания (7). Для усиления сигнала тока на плате управления используется усилитель сигнала УС. Преобразователь напряжения ПР1 присоединен к блоку питания БП1 для управления уровнем напряжения в контактной сети в режиме рекуперации. R_n – сопротивление электроподвижного состава ЭПС2 в режиме тяги. Внешний вид физической модели

электроподвижного состава ЭПС2 приведен на рис. 6.

Графики тяговой нагрузки электроподвижного состава ЭПС2 и напряжения на его токоприемнике, используемые в модели и полученные путем обработки данных поездки локомотива серии 2ЭС10, приведены на рис. 7. Продолжительность фрагмента представленного графика, пересчитанного с использованием принятого коэффициента масштабирования, составляет 10 мин и включает в себя режимы тяги, выбега и рекуперативного торможения (область отрицательных значений).

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных инициатив по гранту № 17-20-01148 офм_РЖД/18.

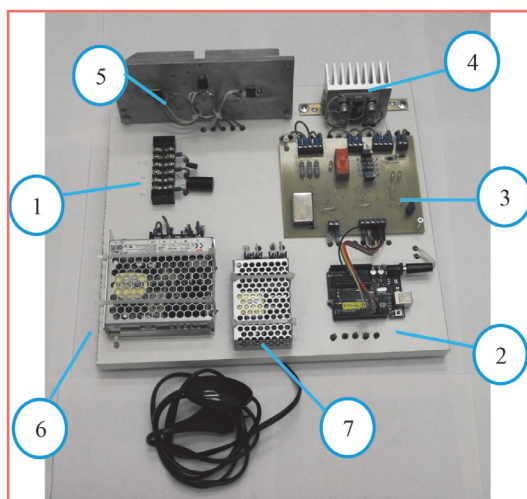


Рис. 6. Физическая модель электроподвижного состава

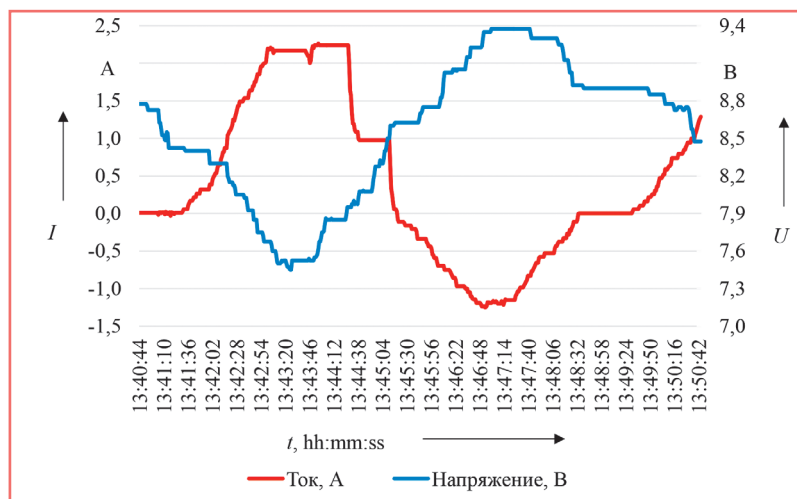


Рис. 7. График электротяговой нагрузки и напряжения на токоприемнике

Литература

1. Гайснер А.Д. Основные тенденции применения и развития систем накопления электроэнергии в современных энергосистемах (мировой опыт) / А.Д. Гайснер, А.Н. Новиков // Энергетическая политика, 2014, № 6, с. 72–81.
2. Обухов С.Г. Буферная система накопления электроэнергии для возобновляемой энергетики / С.Г. Обухов, И.А. Плотников, Е.Ж. Сарсикеев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2012, № 9 (113), с. 137–141.
3. Жук А.З. Распределенные системы накопления электроэнергии на основе парков электромобилей / А.З. Жук, Е.А. Бузоверов, А.Е. Шейндин // Теплоэнергетика, 2015, № 1, с. 3.
4. Гусев Ю.П. Влияние накопителей электроэнергии на пропускную способность распределительных сетей напряжением 6–10 кВ / Ю.П. Гусев, П.В. Субботин // Электричество, 2018, № 1, с. 13–18.
5. Булатов Ю.Н. Применение накопителей энергии и управляемых установок распределенной генерации для снижения провалов напряжения в сетевом энергетическом кластере / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии, 2018, № 2 (38), с. 38–43.
6. Dehghani-Sanij A.R., Tharumalingam E., Dusseault M.B. & Fraser R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. Renewable and Sustainable energy reviews, 104, 192–208. doi:10.1016/j.rser.2019.01.023
7. Salimijazi F., Parra E. & Barstow B. (2019). Electrical energy storage with engineered biological systems. Journal of Biological engineering, 13(1). doi:10.1186/s13036-019-0162-7.
8. Review on energy storage systems control methods in microgrids / Khodadoost Arani A.A., Gharehpetican G., Abedi M. // International

journal of electrical power and energy systems. 2019. 107, pp. 745–757. DOI: 10.1016/j.jepes.2018.12.040.

9. Ragone D.V. Review of battery systems for electrically powered vehicles / D.V. Ragone // SAE Technical paper series. 1968. P. doi: 10.4271/680453.

10. СТО РЖД 07.013–2012. Методика выбора емкости источников электроэнергии для систем постоянного оперативного тока тяговых и трансформаторных подстанций» (в ред. 25 июля 2016 г.). 2012. – М.: ОАО «РЖД». – 16 с.

11. Черемисин В.Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов / В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, А.Е. Перестенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2017, № 2 (66), с. 118–128.

12. Незевак В.Л. Моделирование процессов электропотребления на тягу при изменении параметров графика движения поездов на электрифицированных участках с III и IV типом профиля пути / В.Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2019, № 1 (61), с. 156–166.

13. Nezevak V. Simulation of processes of electric power consumption for traction in conditions of changing the traffic schedule of freight trains at the electrified sections / Nezevak V., Sidorova E., Demin Y. // MATEC Web of conferences. Vol. 239. № 01034. 2018. P. 1–9.

14. В.Л. Незевак. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // Мир транспорта, 2018, т. 16, № 2 (75), с. 84–94.

15. Istomin S. Analysis of electric locomotive 2ES10 operation on the DC track section of the Sverdlovsk railway / Istomin S., Nesewak V. // EB: Elektrische Bahnen. 2015, № 4, с. 186–189.

16. Незевак В.Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии / В.Л. Незевак // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2017, № 4 (68), с. 159–170.

17. Черемисин В.Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового

электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2015, № 10, с. 54–64.

18. Nezevak V. Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system / Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. // Advances in intelligent systems and computing, 2020, № 982, pp. 524–538.

Незевак Владислав Леонидович

Родился в 1975 году. В 1997 году окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Оптимизация взаимодействия железных дорог с энергоснабжающими организациями (на примере Западно-Сибирской железной дороги)». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает доцентом, старшим научным сотрудником кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС. Имеет 28 публикаций в рецензируемых журналах, 5 публикаций, индексируемых в БД Scopus, 4 патента на полезные модели, 7 патентов на изобретения.

Плотников Юрий Викторович

Родился в 1975 году. В 1997 году окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «Информатика и управление в технических системах». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает инженером кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС. Имеет 13 публикаций в журналах, 7 патентов на полезные модели.

Шатохин Андрей Петрович

Родился в 1989 году. Окончил Омский государственный университет путей сообщения по специальности «Подвижной состав электрических железных дорог». Кандидат технических наук. Защитил диссертацию по теме «Разработка методов и средств повышения эффективности применения рекуперативного торможения на железных дорогах

постоянного тока». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС. Имеет 12 публикаций в рецензируемых журналах, 2 публикации, индексируемые в БД Scopus, 3 патента на полезные модели, 2 патента на изобретения.

Nezevak Vladislav

Was born in 1975. In 1997 he graduated from the Omsk State University of Railway Engineering with a degree in “Electricity supply for railway transport”. Candidate of technical sciences, associate professor. In 2000 he defended his thesis on the topic “Optimization of the interaction of railways with energy supplying organizations (using the example of the West Siberian Railway)”. Work experience is 20 years. At present he works as an assistant professor, senior researcher at the Department of electricity supply of railway transport at OmGUPS. He has 28 publications in peer-reviewed journals, 5 publications indexed in the Scopus database, 4 patents for utility models, 7 patents for inventions.

Plotnikov Yuriy

Was born in 1975. In 1997 he graduated from the Omsk State University of Railway Engineering with a degree in “Computer science and management in technical systems”. Work experience is 20 years. At present he is an engineer at the Department of power supply of the railway transport at OmGUPS. He has 13 publications in journals, 7 patents for utility models.

Shakhotin Andrey

Was born in 1989. He graduated from Omsk State Transport University with a degree in “Rolling stock of electric railways”. Candidate of technical sciences. He defended his thesis on the topic “Development of methods and means to increase the effectiveness of the application of regenerative braking on direct current railways”. Work experience is 5 years. At present he works as an assistant professor of the department “Rolling stock of electric railways” at OmGUPS. He has 12 publications in peer-reviewed journals, 2 publications indexed in the Scopus database, 3 patents for utility models, 2 patents for inventions.

Способы коммутации вентилей выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока с коллекторным приводом в режиме тяги

// Ways of switching ventiles of the rectifier-inverter converter locomotive of alternating current with a collector drive in the traction mode //

Власьевский С. В., д.т.н., профессор,
Малышева О. А., к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «ДВГУПС», Хабаровск

Семченко В. В., к.т.н.,
АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», Красноярск

Для плавного регулирования напряжения в электроприводе постоянного тока с коллекторным двигателем используются выпрямительные преобразователи на основе управляемых полупроводниковых приборов. В статье представлен анализ способов коммутации вентилей выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме тяги: поочередная, одновременная и раздельная. Приведены силовые схемы, алгоритмы и диаграммы процессов работы выпрямительно-инверторных преобразователей, которые показывают, что благодаря использованию различных схемных решений и новых алгоритмов управления полупроводниковыми приборами можно добиться значительного уменьшения и сведения к нулю угла сдвига фаз между кривыми тока и напряжения в первичной обмотке трансформатора на стороне переменного тока. Коэффициент мощности выпрямителя при этом становится близким к единице.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, режим тяги, выпрямительно-инверторный преобразователь, коммутация, тиристор, разрядное диодное плечо.

На электровозах переменного тока с коллекторным приводом серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М, 2(3,4), ЭС5К применяются выпрямительно-инверторные преобразователи на основе силовых тиристоров [1, 2, 3, 4]. Эти электровозы эксплуатируются с невысоким коэффициентом мощности, который влияет на расход электроэнергии электровозами на тягу поездов [5]. Коэффициент мощности K_m связан с углом сдвига фаз φ основной гармоники тока и напряжения в первичной

For smooth voltage regulation in a DC electric drive with a collector motor, rectifier converters based on controlled semiconductor devices are used. The article presents an analysis of the switching methods of the valves of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive in traction mode: alternating, simultaneous and separate. The power circuits, algorithms and diagrams of the operation of the rectifier-inverter converters are shown, which show that through the use of various circuit solutions and new control algorithms for semiconductor devices, it is possible to significantly reduce and reduce to zero the phase angle between the current and voltage curves in the primary winding of the transformer by AC side. The power factor of the rectifier in this case becomes close to unity.

Keywords: AC electric locomotive, traction mode, rectifier-inverter converter, switching, thyristor, discharge diode arm.

обмотке тягового трансформатора электровоза. В свою очередь угол φ зависит от величины нерегулируемого угла открытия тиристоров α_0 и угла коммутации γ тока силовых вентилей преобразователя.

Основные сведения о коммутации вентилей преобразователя

Известно, что слово «коммутация» связано с понятием изменения или перемены чего-либо. В электрической цепи понятие

коммутации связано с изменением ее соединения, например, включение, выключение и переключение ее отдельных частей при помощи командо-аппаратов, реле, контакторов, ключей и других устройств [6]. В силовых полупроводниковых преобразователях коммутация вентилей предполагает включение тока в одном вентиле, под действием которого одновременно в другом вентиле ток выключается. Здесь вентили выступают в качестве ключей. С их помощью происходит коммутация токов в цепях, или, иначе, одновременное перекрытие двух процессов – включения и выключения цепей.

В однофазной выпрямительной и инверторной схемах коммутационные процессы происходят, как правило, на границе смены одного полупериода переменного напряжения сети на другой. Такую коммутацию часто называют естественной сетевой. Процесс коммутации вентилей происходит за некоторое время, которое называется углом коммутации γ . Этот угол зависит от величин тока коммутации и напряжения в обмотке трансформатора, а также от индуктивного сопротивления в цепи коммутации обмоток трансформатора.

В простой мостовой схеме выпрямителя на тиристорах, который подключен к вторичной обмотке трансформатора, угол коммутации γ определяется из выражения

$$\cos \gamma = \cos \alpha_0 - \frac{I_K \cdot X_T}{U_m}$$

где I_K – ток коммутации во вторичной обмотке трансформатора, причем $I_K = I_d$, I_d – выпрямленный ток в цепи нагрузки;

U_m – амплитудное значение переменного напряжения во вторичной обмотке трансформатора;

X_T – индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

α_0 – минимальный нерегулируемый угол открытия тиристоров выпрямителя.

Процесс коммутации влияет на величину коэффициента мощности K_m , который

является основным энергетическим показателем выпрямителя

$$K_M = \nu \cdot \cos \varphi,$$

где ν – коэффициент искажения формы переменного тока в первичной обмотке тягового трансформатора, φ – угол сдвига фаз переменных напряжения и первой гармоники тока в первичной обмотке тягового трансформатора.

Угол φ для мостовой схемы выпрямителя приближенно можно определить из выражения

$$\varphi \approx \alpha_0 + \frac{\gamma}{2}.$$

Таким образом, K_M уменьшается с увеличением угла коммутации γ и с увеличением искажения формы переменного тока в первичной обмотке тягового трансформатора, приводящим к уменьшению коэффициента ν .

Поочередная коммутация вентилей выпрямительно- инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режиме тяги

Все современные электровозы переменного тока с коллекторным приводом применяют четырехзонные (многомостовые) выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП) на основе тиристоров, с помощью которых осуществляется плавное регулирование выпрямленного напряжения выпрямителя в режиме тяги и инвертора в режиме рекуперативного торможения электровоза [7].

Естественная коммутация вентилей как в однозонном (один мост), так и в многозонном (несколько параллельных мостов) выпрямителях происходит при смене полярности напряжения сети и предполагает симметричную схему организации коммутации, когда в каждом полупериоде одновременно подают импульсы управления на два однофазных плеча моста, находящихся в разных контурах коммутации. По причине резкого (большая скорость нарастания или спада тока) изменения тока во вторичной обмотке трансформатора в ней наводится ЭДС самоиндукции с отрицательной полярностью на анодах тиристоров одного из двух однофазных плеч моста, что затрудняет их отпирание. В результате происходит неорганизованная поочередная коммутация тиристоров плеч, когда ток коммутации сначала протекает в одном короткозамкнутом контуре, возрастая от нуля до установившегося значения,

а затем, по его окончании, в другом короткозамкнутом контуре, также возрастая от нуля до установившегося значения.

В результате для надежного открытия тиристоров плеч моста приходится иметь значительную длительность импульсов управления, которая перекрывала бы вынужденную задержку по времени открытия тиристоров одного из двух плеч моста. Это обстоятельство вынуждает иметь достаточно большую длительность импульсов управления тиристоров плеч преобразователя, равную примерно 800–1000 мкс [8].

Учитывая описанный выше процесс коммутации вентилей на всех современ-

первичной и двух вторичных обмоток, одна из которых составлена из нескольких последовательно соединенных секций. Следует только иметь в виду, что эти две вторичные обмотки на каждой зоне составлены из разных секций. Одна обмотка не регулируется тиристорами ВИП по напряжению и составлена из секций, имеющих разное число витков, причем, чем выше зона, тем большее количество витков она содержит. Напряжение другой обмотки регулируется, и на всех зонах она содержит одинаковое количество витков. В результате такого построения на 2, 3 и 4-й зонах возникает несимметричная схема прохождения коммутации,

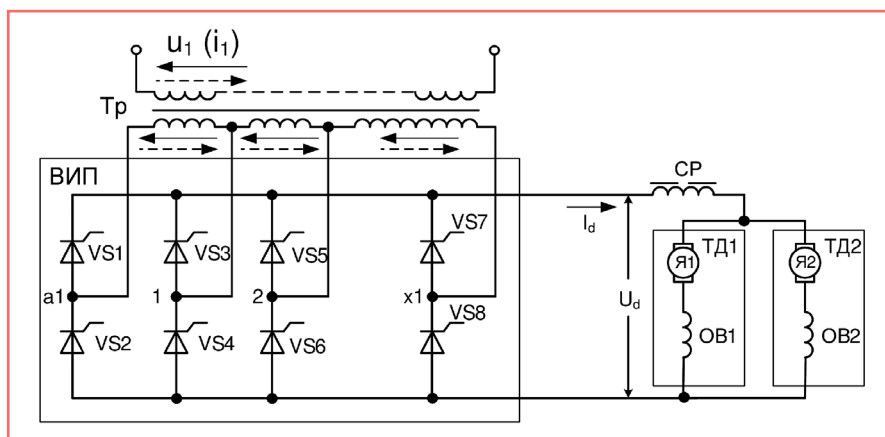


Рис. 1. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока с четырехзонным ВИП

ных электровозах переменного тока на 2, 3 и 4-й зонах регулирования, в ВИП применяется способ организации поочередной коммутации вентилей, получивший название типового [9]. На рис. 1 изображена упрощенная силовая схема электровоза с четырехзонным ВИП, а на рис. 2 – процессы работы ВИП на 4-й зоне с $\alpha_p = 90^\circ$ (α_p – регулируемый по фазе угол открытия тиристоров). В таблице 1 представлен типовой алгоритм управления ВИП на 1–4-й зонах регулирования напряжения.

Процессы работы ВИП с типовым способом его управления на 4-й зоне заключаются в следующем.

В многозонном ВИП при образовании схемы каждой зоны, кроме первой, тяговый трансформатор можно рассматривать как трехобмоточный, состоящий из

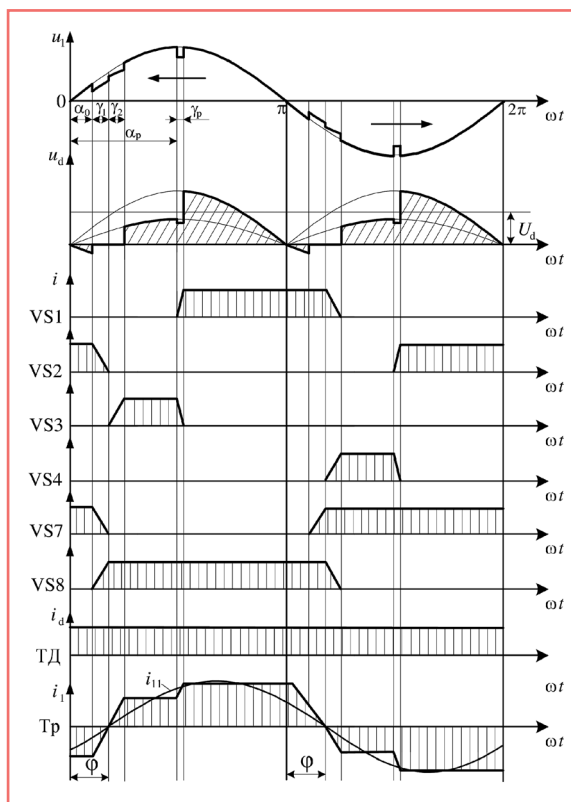


Рис. 2. Процессы работы ВИП на 4-й зоне регулирования с $\alpha_p = 90^\circ$

Таблица 1. Алгоритм управления плеч ВИП

Номер зоны	Полупериод	Плечи ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
1	←			$\alpha_0 \alpha_p$			α_p		
	→				α_p	α_0			
2	←	α_p		$\alpha_{зад}$			α_0		
	→		α_p		$\alpha_{зад}$	α_0			
3	←					$\alpha_{зад}$			α_0
	→				α_p		$\alpha_{зад}$	α_0	
4	←	α_p		$\alpha_{зад}$					α_0
	→		α_p		$\alpha_{зад}$			α_0	

состоящая из большого и малого короткозамкнутых контуров.

Суть ее заключается в том, что применяемый в настоящее время в многозонных тиристорных преобразователях электро-возов переменного тока типовой способ управления (тиристорами плеч с точки зрения организации естественной коммутации вентилей) основан на поочередном включении двух однофазных плеч, вступающих в очередной цикл работы при смене полярности напряжения сети. Поочередность заключается в задержке включения одного плеча относительно другого в зависимости от длительности угла коммутации γ_1 большого контура. Типовой способ реализуется через алгоритм управления ВИП, который представлен в таблице 1.

Поочередная коммутация большого и малого контуров организуется с помощью датчиков коммутации и специальных устройств в системе управления ВИП, которые следят за процессом коммутации большого контура, а затем, по его окончании, дают разрешение на начало коммутации в малом контуре путем подачи импульсов управления с углом $\alpha_{зад}$ на тиристоры второго однофазного плеча [10, 11]. Таким образом, организуется искусственная задержка в подаче импульсов управления с минимальным нерегулируемым углом α_0 , которые получили название задержанных импульсов с углом $\alpha_{зад}$. В результате коммутация проходит последовательно в два этапа.

Типовой способ организации естественной коммутации вентилей ВИП в режиме выпрямителя имеет следующие недостатки:

- общая длительность поочередной коммутации увеличена по сравнению с той, которая происходила бы одновременно по двум контурам, так как в нее входит сумма коммутаций большого γ_1 и малого γ_2 контуров, проходящих последовательно друг за другом, равная $g = \gamma_1 + \gamma_2$;

- общее индуктивное сопротивление рассеяния цепи переменного тока электровоза при поочередной коммутации увеличено, так как в него входит сумма индуктивных сопротивлений рассеяния секций вторичной обмотки, составляющих большой и малый контуры, и приведенного к виткам этих секций индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки трансформатора;

- система управления ВИП значительно усложнена, так как в ней применено большое количество дополнительных и специальных устройств (датчики коммутации, логические элементы, преобразователи, усилители) и их связи между собой и другими устройствами системы;

- длительность импульсов управления увеличена до 1000 мкс с целью повышения надежности работы плеч ВИП в случае отказа системы слежения за процессом коммутации большого контура. Такая длительность импульсов требует увеличенного расхода энергии источника питания выходных формирователей импульсов управления тиристорами ВИП, получившей название СФИ (система формирования импульсов).

Математическое моделирование процессов работы электровоза в номинальном режиме на 4-й зоне регулирования в режиме тяги, расположенного возле тяговой подстанции, при применении типового способа организации коммутации вентилей ВИП показало следующие результаты: коэффициент мощности $K_m = 0,8$ и коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети $K_{U1} = 4,66$ [12].

Одновременная коммутация вентилей выпрямительно-инверторного преобразователя переменного тока в режиме тяги

Для устранения недостатков типового способа организации поочередной коммутации вентилей в работе [13] был предложен способ одновременной

коммутации вентилей ВИП, основанный на одновременном включении тиристорных плеч в каждом полупериоде напряжения сети. Суть этого способа организации коммутации заключается в том, что импульсы управления одновременно подаются на тиристоры не только двух однофазных плеч моста, но и на третье противофазное плечо этого моста. При такой организации коммутации нормальные положительные потенциальные условия для открытия второго однофазного плеча обеспечиваются благодаря включению третьего противофазного плеча. В этом случае происходит разряд ЭДС самоиндукции секции вторичной обмотки через третье плечо и снимается, таким образом, отрицательный потенциал с анодов тиристоров второго однофазного плеча, который задерживал его включение в случае одновременной подачи импульсов управления на два однофазных плеча. Такой способ создает нормальные потенциальные условия для открытия импульсами управления α_0 второго однофазного плеча моста зоны без всякой задержки. Благодаря одновременному включению на 2, 3 и 4-й зонах двух однофазных плеч и третьего противофазного плеча естественная коммутация разбивается на три малых контура, которые одновременно являются разрядными контурами для энергии ЭДС-самоиндукции секций вторичной обмотки трансформатора. Так, на 4-й зоне, например, в полупериоде, обозначенном сплошной стрелкой, образуются три контура: секции 1–2-х1, VS3, VS7 – первый контур, секция а1–1, VS2, VS4 – второй контур, секция 1–2-х1, VS4, VS8 – третий контур. Одновременное создание трех малых контуров в начальной части каждого полупериода напряжения создает схему параллельного включения индуктивных сопротивлений двух из трех контуров, что в итоге уменьшает общее индуктивное сопротивление коммутации. В итоге угол коммутации γ и угол φ уменьшаются, а коэффициент мощности K_m увеличивается.

На рис. 3 изображены процессы работы ВИП при способе одновременной коммутации вентилей путем открытия трех плеч, а в таблице 2 представлен алгоритм управления плечами ВИП с использованием способа одновременной коммутации трех плеч.

Применение способа одновременной коммутации вентилей ВИП создает следующие его преимущества перед типовым:

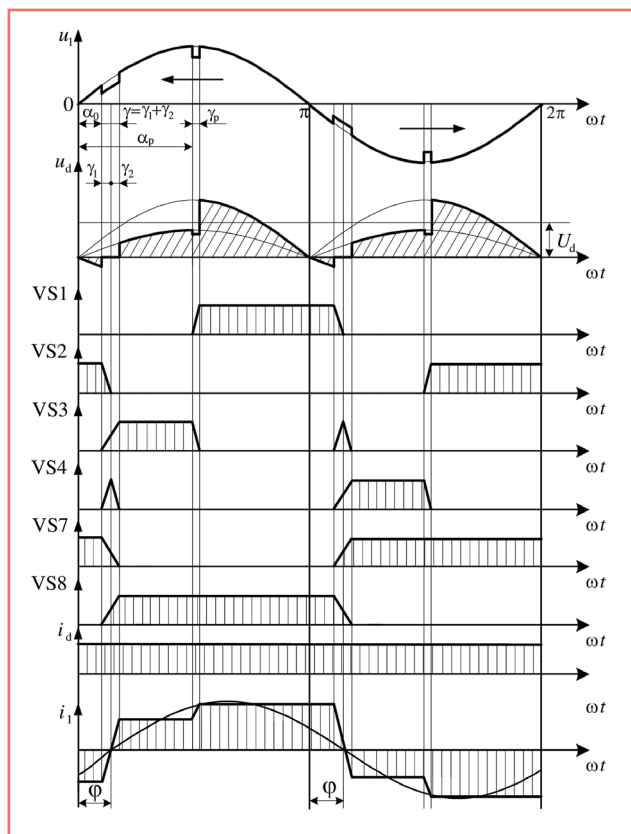


Рис. 3. Процессы работы ВВП на 4-й зоне регулирования с $\alpha_p = 90^\circ$ при одновременной коммутации вентиляей

- общая длительность основной коммутации g уменьшается, так как она проходит одновременно в трех малых контурах, два из которых соединены между собой параллельно;

- общее индуктивное сопротивление рассеяния контуров одновременной коммутации уменьшается, так как во вторичной обмотке трансформатора оно определяется параллельным соединением двух контуров, участвующих одновременно в коммутации;

- организация коммутации во всех трех малых контурах осуществляется одновременной подачей импульсов управления с фазой α_0 на три плеча и не

требует задержки импульсов на один из них в зависимости от величины угла коммутации. В связи с этим отпадают все устройства и их связи для слежения за коммутацией и организации задержки импульсов;

- в связи с улучшением при новом способе потенциальных условий работы тиристорных плеч в интервале коммутации длительность импульсов управления тиристорами можно сократить в четыре раза и довести до 250 мкс.

Проведенное математическое моделирование процессов работы электроваза, расположенного возле тяговой подстанции, в номинальном режиме на 4-й зоне регулирования в режиме тяги с типовым способом организации коммутации (поочередная коммутация) и способом организации одновременной коммутации вентиляей плеч ВВП показало преимущества последнего способа, выражающегося в повышении коэффициента мощности K_m на 1,84% и снижении коэффициента искажения синусоидальности напряжения сети K_{U1} на 3,4% [14]. Если электроваз будет расположен на расстоянии 25 км от тяговой подстанции (середина межподстанционной зоны), то преимущества применения одновременной коммутации вентиляей ВВП еще больше возрастают – K_m увеличивается на 2%, а K_{U1} уменьшается на 5,6%.

Таблица 2. Алгоритм управления плеч ВВП при одновременной коммутации вентиляей

Номер зоны	Полупериод	Плечи ВВП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
1	←			$\alpha_0 \alpha_p$			A_0		
	→				α_p	α_0			
2	←	α_p		α_0	α_0		α_0		
	→		α_p	α_0	α_0	α_0			
3	←			α_p		α_0	α_0		α_0
	→				α_p	α_0	α_0	α_0	
4	←	α_p		α_0	α_0				α_0
	→		α_p	α_0	α_0			α_0	

требует задержки импульсов на один из них в зависимости от величины угла коммутации. В связи с этим отпадают все устройства и их связи для слежения за коммутацией и организации задержки импульсов;

- в связи с улучшением при новом способе потенциальных условий работы тиристорных плеч в интервале коммутации длительность импульсов управления тиристорами можно сократить в четыре раза и довести до 250 мкс.

Проведенное математическое моделирование процессов работы электроваза, расположенного возле тяговой подстанции, в номинальном режиме на 4-й зоне регули-

Раздельная коммутация вентиляей выпрямительно-инверторного преобразователя электроваза переменного тока в режиме тяги

Исследования, проведенные в ДВГУПС и ИрГУПС в направлении повышения коэффициента мощности K_m электроваза и снижения коэффициента искажения синусоидальности напряжения сети K_{U1} , показали, что эти параметры могут быть улучшены при применении разрядного диодного плеча, включенного параллельно выходным выводам ВВП. В этом случае в равных условиях сравнения и при применении способа одновременной коммутации вентиляей ВВП коэффициент K_m повышается на 2,4%, а K_{U1} снижается на 3,2% [15, 16] по сравнению со способом одновременной коммутации без применения разрядного диодного плеча.

Несмотря на положительные результаты проведенных исследований, рассмотренных выше, значительного повышения K_m и снижения K_{U1} до последнего времени не было получено. В 2016–2019 годах в ДВГУПС и ИрГУПС были проведены исследования по разработке технических решений в области ВВП, которые были направлены на значительное повышение K_m электроваза и снижение K_{U1} . Так, в 2016–2017 годах в ИрГУПС был разработан ВВП на основе силовых транзисторов, который позволил добиться повышения K_m электроваза в режиме тяги до величины 0,96 [17]. В 2018–2019 годах в ДВГУПС было разработано техническое решение в виде блока реактивных токов (БРТ), которое, по данным математического моделирования, позволило при подключении его к выходным выводам известного ВВП на базе тиристорных значительно повысить K_m электроваза в его номинальном режиме работы на 4-й зоне регулирования в режиме тяги и довести его до величины 0,96. Проведенные экспериментальные исследования на производственной базе Дорожного центра внедрения (ДЦВ) Красноярской железной дороги подтвердили результаты теоретических исследований и математического моделирования процессов работы ВВП совместно с БРТ на испытательном стенде в локомотивном депо Боготол и на опытной секции 1784 трехсекционного электроваза ВЛ80Р № 1764/1784.

Суть данного технического решения заключается в следующем. Применение разрядного диодного плеча совместно с ВВП позволило использовать

сдвига фаз φ между первой гармоникой переменного тока и напряжения близкой к нулю, а коэффициент мощности – близкий к единице.

На рис. 4 представлена упрощенная схема электровоза с БРТ, присоединенного к выходным выводам ВИП, а на рис. 5 – диаграммы процессов работы в элементах силовой схемы (тяговый трансформатор, ВИП, БРТ, тяговые двигатели).

Выводы

Разработка способа раздельной коммутации вентилей выпрямительно-инверторных преобразователей электро-возов переменного тока в режиме тяги позволяет:

1. Значительно уменьшить потребление реактивной энергии из сети, что приводит к снижению потребления электро-возом полной энергии из сети;
2. Значительно повысить коэффициент мощности электровоза.

Литература

1. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации – М.: Транспорт, 1982. 541 с.
2. Электровоз ВЛ85. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1986. – 572 с.
3. Электровоз магистральный ЭЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Электрические схемы. – Новочеркасск, 2004. – 248 с.
4. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
5. Энергетические характеристики отечественных электровозов переменного тока / А. Л. Лозановский // Электровозостроение: сб. науч. тр. Всесоюз. науч.-исслед., проект.-констр. и технол. ин-та электровозостроения. Т. 25. – Новочеркасск: Изд-во ВЭЛНИИ, 1984, с. 58–68.
6. Политехнический словарь / Гл. ред. И. И. Артоболевский. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 608 с.
7. Эксплуатация силовых преобразователей электроподвижного состава / Голованов В. А., Капустин Л. Д., Хомяков Б. И. – М.: Транспорт, 1979. – 207 с.
8. Электронное оборудование электровоза ВЛ80: Ремонт и техническое обслуживание / Горбань В. Н., Донской А. Л., Шабалин Н. Г. – М.: Транспорт, 1984. – 184 с.
9. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80Р. Капустин Л. Д., Копанев А. С., Лозановский А. Л. – М.: Транспорт, 1979. – 175 с.
10. Разработка и исследование электровоза ВЛ60КР / В. А. Голованов, С. В. Власьевский, В. В. Находкин, В. Н. Горбань, А. Н. Савоськин, В. Е. Коваль // Параметры перспективных электро-возов и вопросы электрической тяги: Труды ЦНИИ МПС, вып. 597. – М., 1978, с. 69–85.
11. Система слежения за углом коммутации тиристорных преобразователей магистральных

электро-возов / С. В. Власьевский, Б. М. Наумов, В. А. Голованов, Ю. М. Филипенко, О. Р. Калабухов // Материалы 28-й научно-технической конференции кафедр института с участием представителей железных дорог, промышленных и строительных предприятий Дальнего Востока. – Хабаровск: ХаБииЖТ, 1974, вып. 7, с. 89–91.

12. Власьевский С. В. Процессы коммутации тока вентилей в выпрямительно-инверторных преобразователях электро-возов однофазно-постоянного тока: Монография. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 112 с.: ил.

13. Власьевский С. В. Выбор способа организации процесса коммутации в выпрямительно-инверторном преобразователе электро-воза однофазно-постоянного тока // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Тр. второй науч.-практ. конф.: в 2-х кн. Кн. 1. – М.: МИИТ, 1999, с. 4–18.

14. Власьевский С. В. Новая организация коммутации тока вентилей выпрямительно-инверторного преобразователя для повышения энергетических показателей электро-возов однофазно-постоянного тока // 2-й Международный симпозиум «Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте»: сб. тр. / Под ред. д. т. н., проф. Р. Р. Мамошина. 21–22 марта 2000 г. – М.: МИИТ, 2000, с. 91–93.

15. Vlas'evskii S.V., Mel'nichenko O.V., Malysheva O.A. Emergency operation processes in the thyristor rectifier of an alternating current electric locomotive // Russian electrical engineering, 2016. Vol. 87(2), pp. 68–72.

16. Власьевский С. В., Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Шрамко С. Г., Патент на изобретение № 2561913 Способ управления многозонным выпрямительно-инверторным преобразователем однофазного переменного тока / Власьевский С. В., Семченко В. В., Мельниченко О. В. // Заявка 2014115762 от 18.04.2014, опубликовано: 10.09.2015. Бюл. № 25.

17. Яговкин Д. А. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электро-воза переменного тока в режиме тяги на первой зоне регулирования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2014, том 14, № 4, с. 52–59.

18. Власьевский С. В., Малышева О. А., Мельниченко О. В. Аварийные процессы работы тиристорного выпрямителя электро-воза переменного тока // Электротехника, 2016, № 2, с. 12–16.

Власьевский Станислав Васильевич

Родился в 1939 году. В 1966 году окончил Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта. Доктор технических наук, профессор. В 2001 году защитил докторскую диссертацию на тему «Повышение эффективности работы выпрямительно-инверторных преобразователей электро-возов однофазно-постоянного тока с рекуперативным торможением». В настоящее время – профессор кафедры «Электротехника, электроника, электромеханика» ДВГУПС. Почетный работник науки и техники Российской Федерации, Почетный железнодорожник, академик АЭН РФ.

Автор около 200 научных работ, в том числе 24 патентов.

Малышева Ольга Александровна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила ДВГУПС по специальности «Электроснабжение железных дорог». Кандидат технических наук, доцент. В 2008 году защитила диссертацию на тему «Внутрисистемный учет электрической энергии и контроль ее качества на электро-возах переменного тока». Опыт работы – 14 лет. В настоящее время работает заведующей кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Имеет 38 научных трудов.

Семченко Виктор Васильевич

Родился в 1954 году. В 1992 году окончил Иркутский институт инженеров транспорта (ИрИИТ) по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию на тему «Диагностирование систем управления электро-возов переменного тока с тиристорными преобразователями». Опыт работы – 42 года. В настоящее время работает генеральным директором АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги». Имеет около 30 научных трудов.

Vlasevsky Stanislav

He was born in 1939. In 1966 he graduated from the Khabarovsk Institute of Railway Engineering. He is doctor of technical sciences, professor. In 2001 he defended his doctoral thesis on Improving the efficiency of rectifier-inverter converters of single-phase direct current electric locomotives with recuperative braking. At present he is a professor at the Department of electrical engineering, electronics, electromechanics of the Far Eastern State Transport University. He is honorary worker of science and technology of the Russian Federation, honorary railway worker, Academician of the AES of the Russian Federation. Author of about 200 scientific works, incl. 24 patents.

Malysheva Olga

Was born in 1983. In 2005 she graduated from the Far Eastern State Transport University with a degree in Power Supply of Railways. Candidate of technical sciences, associate professor. In 2008 she defended her thesis on the topic "Intra-system accounting of electric energy and its quality control on AC electric locomotives". Work experience is 14 years. At present she works as the head of the department "Electrical engineering, electronics and electromechanics" of the FESTU. He has 38 scientific papers.

Semchenko Viktor

Was born in 1954. In 1992 he graduated from the Irkutsk Institute of Transport Engineers (IrlIT) with a degree in Electrification of Railway Transport. Candidate of technical sciences. In 2010 he defended her thesis on the topic "Diagnosis of control systems for AC electric locomotives with thyristor converters". Work experience is 42 years. At present he works as the general manager of JSC "Road center for the implementation of the Krasnoyarsk railway". He has about 30 scientific papers.

Результаты опытной эксплуатации синхронных тяговых электродвигателей на высокоскоростном электропоезде «Сапсан»

// Results of experimental service of synchronous traction electric motors on high-speed train "Sapsan" //

Брагин А. Г., к.т.н.,
Иващенко В. О., к.т.н., доцент,
Лысов Н. В., к.т.н., Марков К. В.,
ПГУПС, Санкт-Петербург

В статье рассматриваются результаты опытной эксплуатации прогрессивной системы тягового электропривода – синхронных тяговых электродвигателей на высокоскоростных электропоездах «Сапсан».

Ключевые слова: синхронный двигатель, «Сапсан», Velaro РУС, асинхронный двигатель.

В декабре 2011 года ОАО «РЖД» заключило контракт с компанией «Siemens AG» на дополнительную поставку восьми высокоскоростных поездов «Сапсан». Поезда прибыли в Россию в 2014 году. После запуска в эксплуатацию электропоездов второй серии поставки в сдвоенном режиме было принято решение оборудовать один из них комплектом тягового привода с синхронными тяговыми электродвигателями. Модификация проводилась для отработки конструктивных и программных решений использования тягового привода на базе синхронных тяговых электродвигателей с целью экономического обоснования распространения этого решения на весь парк электропоездов платформы Velaro в России.

Базой экспериментального поезда для установки синхронного электродвигателя, возбуждаемого от постоянных магнитов (ЕТ-РММ), был выбран прошедший все испытания и допущенный к эксплуатации с пассажирами серийный поезд Velaro RUS2 ЭВС1–16. Для этого компанией «Siemens AG» был поставлен комплект электрооборудования и проведены работы по демонтажу/монтажу оборудования. По окончании монтажных работ были проведены приемочные и сертификационные испытания и получен допуск модернизированного электропоезда на пути общего пользования. После завершения

The article discusses the results of experimental service of a progressive traction electric drive system – synchronous traction motors on high-speed trains "Sapsan".

Keywords: synchronous motor, "Sapsan", Velaro RUS, rotary-field motor.

испытаний электропоезд был допущен к подконтрольной пассажирской эксплуатации сроком на один год. Электропоезд ЭВС1–16 эксплуатировался в регулярном графике оборота высокоскоростных электропоездов.

Программный пакет для модернизированного электропоезда был соответствующим образом переработан для обеспечения возможности одновременного управления комплектами электрооборудования с асинхронными и синхронными тяговыми электродвигателями.

Три вагона с приводом – головной SR01, с преобразователем SR07 и головной SR10 – не были изменены, на этих вагонах были оставлены асинхронные тяговые электродвигатели (АТД).

В моторном вагоне с преобразователем SR04 (рис. 1) были установлены два синхронных двигателя, возбуждаемых от постоянных магнитов (ДПМ). ДПМ были оборудованы на штатном месте для установки двигателя приводной тележки.

Основные данные АТД и ДПМ приведены в таблице 1.

На каждой тележке вагона с ДПМ один из асинхронных двигателей был демонтирован и заменен на ДПМ, второй АТД тележки был электрически отсоединен со стороны тягового преобразователя, но механически остался соединен с редуктором колесной пары. ДПМ были установлены на внутренние оси 2 и 3. Так как ДПМ выполнены с естественным охлаждением, охлаждающие вентиляторы тележек были демонтированы и на их место установлены трехфазные коммутационные контакторы. Контейнер с тяговым преобразователем также был модифицирован. В связи с тем, что синхронные двигатели

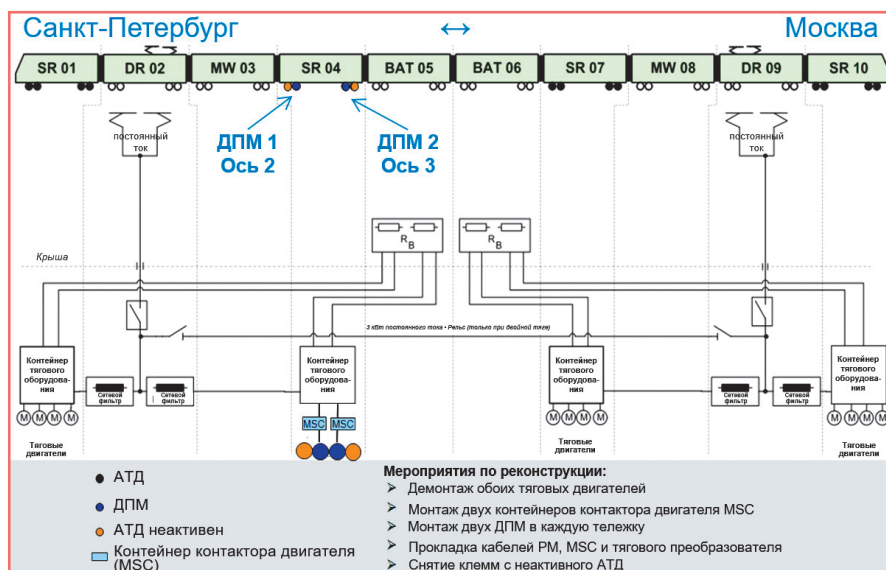


Рис. 1. Структурная схема модификации электропоезда с ДПМ

Таблица 1. Сравнение тяговых двигателей АТД и ДПМ

Критерий сравнения	АТД 1ТВ2019-1GC02	ДПМ 1DB2222-0GA04
Механическое оборудование	Идентичное	
Монтажное пространство	Идентичное	
Подвеска	Идентичная	
Муфта	Идентичная	
Передаточное число тягового редуктора, о.е.	3,033	
Подшипник	Радиальный шарикоподшипник 6016-85/105AX/150°/STI	
Масса, кг	750 + 3%	775 + 3%
Габаритные размеры, мм	600 x 550 x 700	680 x 640 x 700
Момент инерции, кгм ²	2,75	4,7
Охлаждение	Принудительная вентиляция	Самовентилируемый (три контура охлаждения, из которых один герметично закрытый)
Степень защиты IP	IP13	IP55
Мощность на валу, кВт	500	667

не могут быть включены параллельно, каждый ДПМ был подключен к индивидуальному инвертору. Один из инверторов был образован штатно установленными в блоке преобразователя фазными модулями, а второй сформирован из модулей 4QS-регулятора тягового преобразователя двухсистемного электропоезда (рис. 2).

Общая тяговая мощность секции 1 составляет 3,333 МВт. Секция 2 (SRT07 и SRT10) оборудована штатными асинхронными тяговыми электродвигателями, общая мощность которых составляет 4 МВт.

На рис. 3 представлены расчетные тяговые и тормозные характеристики модернизированного электропоезда – красными линиями показаны характеристики до проведения модернизации, т.е. при использовании 16 АТД, зелеными линиями – характеристики после проведения модернизации. Черным цветом построена характеристика сил сопротивления движению на площадке, синим – аналогичная

характеристика при движении поезда на подъеме 15‰.

По приведенным тяговым и тормозным характеристикам был выполнен тяговый расчет, который показал, что на участке Санкт-Петербург – Москва время в пути электропоезда 12 АТД + 2 ДПМ возросло на 37 секунд (1,4%), а при отказе 4 АТД (8 АТД + 2 ДПМ) – на 104 секунды (4%). При выходе из строя вагона с ДПМ оставшаяся мощность будет та же, что и у электропоезда с 12 АТД. В режиме служебного торможения ДПМ также переводится в режим электрического торможения, однако ввиду того, что два электрически отключенных АТД не участвуют в электродинамическом торможении, тормозной эффект снижается. При экстренном торможении преобразователь с ДПМ отключается (два ДПМ не могут обеспечить то же тормозное усилие, что четыре АТД), поэтому вагон SR04 в этом режиме обеспечивает только механическое торможение.

В отличие от АТД в невозбужденном состоянии, ДПМ генерирует напряжение, как только он начинает вращаться. Это напряжение линейно возрастает со скоростью. У синхронных двигателей вместе с отключением преобразователя для исключения режима подвода энергии из двигателя отключаются контакторы, причем на каждую фазу предусмотрен один контактор. Если контактор «залипает», разъединение обеспечивается при помощи двух других фаз. Если отказывают два контактора (без неполадки в двигателе или преобразователе), скорость поезда ограничивается до 140 км/ч, чтобы ограничить напряжение электродвигателя.

Для улучшения охлаждающих свойств электродвигатели сконструированы с применением «капсулирования», т.е. всасываемый снаружи холодный воздух не вступает в соприкосновение с электрической обмоткой, потому из-за загрязнения не возникает износ или истирание (рис. 4, 5). Пространство воздушного зазора и активных элементов статора (лобовые части обмотки) и ротора охлаждается посредством внутреннего контура, заключенного в кожух. Тем самым заметно сокращается вероятность попадания посторонних частиц с потенциальным повреждением обмотки по сравнению с АТД. Кроме того, уменьшается вероятность откладывания токопроводящей пыли, тем самым повреждение изоляции у ДПМ менее вероятно, чем у АТД.

Модернизированный электропоезд эксплуатировался в режимах одиночного и сдвоенного движения в течение 13 месяцев. Техническое обслуживание электропоезда проходило с теми же интервалами по пробегу, что и остальные эксплуатируемые электропоезда. Кроме плановых работ при техобслуживании дополнительно проводилось считывание

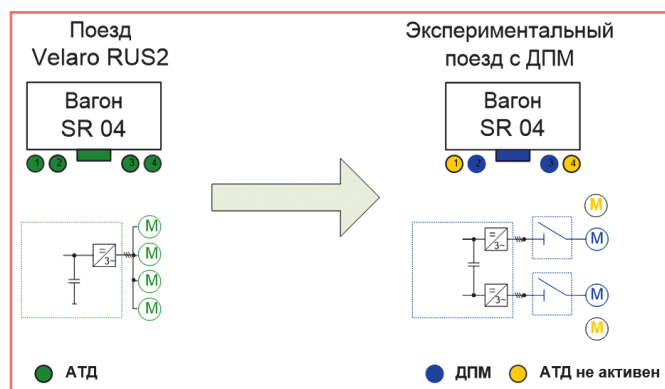


Рис. 2. Структурная схема модификации тягового оборудования

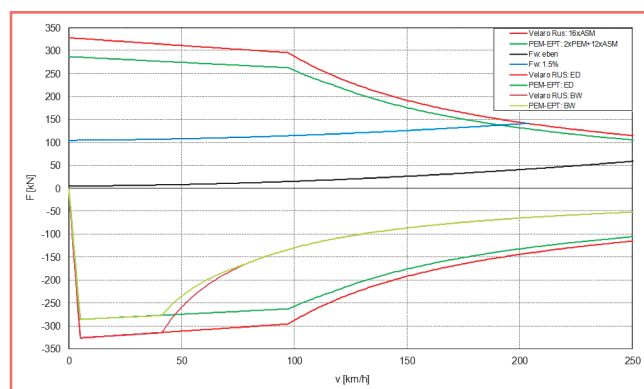


Рис. 3. Сравнение тяговых характеристик электропоезда с 16 АТД и модернизированного электропоезда 12 АТД + 2 ДПМ

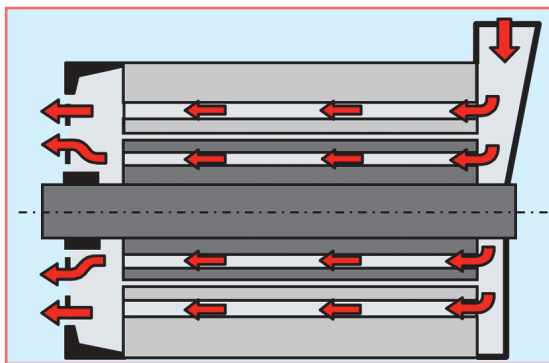


Рис. 4. Контур охлаждения АТД

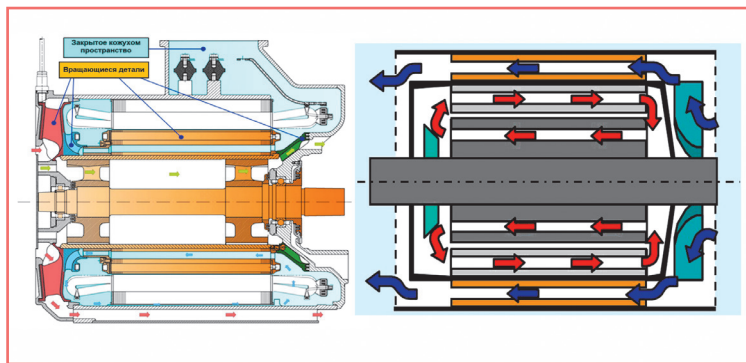


Рис. 5. Контуры охлаждения ДПМ

информации с регистратора данных системы автопилот (при опытной эксплуатации эта система регистрировала расширенный набор сигналов в сравнении с остальными поездами), а также брались пробы масла из тяговых редукторов, проводилась эндоскопия охлаждающих каналов ДПМ. За 13 месяцев суммарный пробег электропоезда составил более 480 тыс. км. За указанный период не было зафиксировано отказов и нештатных диагностических сообщений тягового привода с ДПМ.

В результате опытной эксплуатации электропоезда были получены важные

сведения о нагреве элементов тягового привода, режимах боксования и юза, проведено сравнение энергопотребления приводов с ДПМ и АТД при условии одинаковой суммарной мощности электропоезда (12 ДПМ и 16 АТД).

На рис. 6 и 7 приведены графики опытных характеристик ДПМ и АТД при разгоне электропоезда.

Расход электроэнергии фиксировался штатно установленными счетчиками электроэнергии фирмы LEM. Счетчик фиксирует текущие показания активной положительной, отрицательной и реактивной положительной и отрицательной энергий и записывает их во внутреннюю память с программируемым интервалом (15 минут). Показания также автоматически фиксируются при снятии и подаче напряжения питания на счетчик (+110 В).

потребления электроэнергии тяговыми секциями электропоезда ЭВС1-16 за ноябрь. Из диаграммы видно, что потребление электроэнергии тяговой секцией с 8 АТД на 8,9% больше (среднее значение), чем тяговой секцией с 4 АТД + 2 РЕМ, что объясняется большей установленной мощностью тяговой секции с 8 АТД.

Пересчет энергопотребления для условия оборудования ЭВС двенадцатью ДПМ показал, что реальная экономия электроэнергии находится на уровне 5% при реализации максимальных скоростей до 250 км/ч.

Основные результаты опытной эксплуатации:

- комплект тягового оборудования с применением в его составе тяговых электродвигателей с постоянными магнитами показал свою работоспособность при эксплуатации в штатном режиме обращения высокоскоростного электропоезда;
- за время эксплуатации контролируемые температуры (средние значения температур обмоток статора, подшипников с приводной и неприводной стороны) в рабочем режиме были ниже аналогичных контролируемых значений АТД;

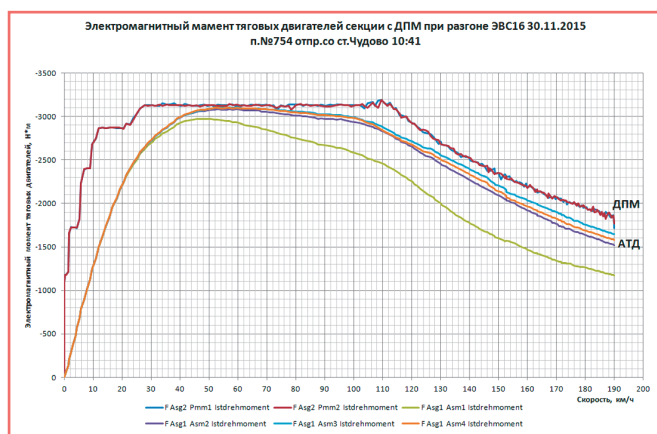


Рис. 6. Электромагнитные моменты ДПМ и АТД

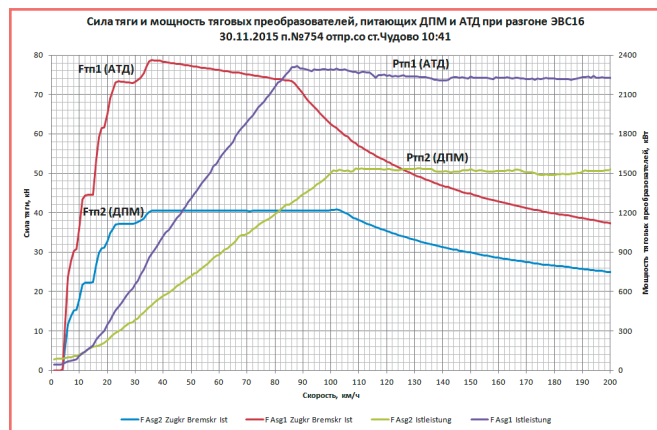


Рис. 7. Сила тяги и мощность преобразователей, питающих АТД и ДПМ

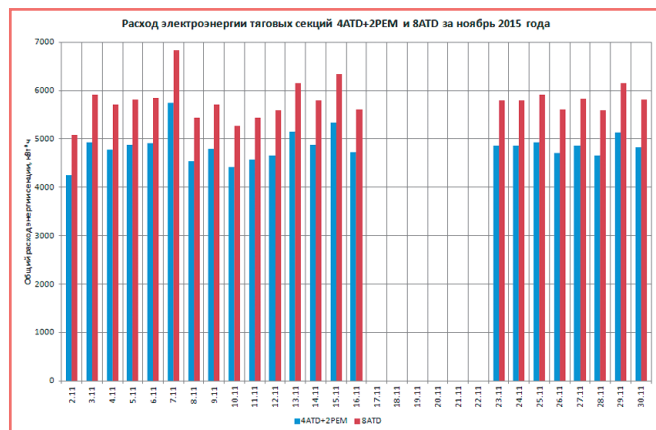


Рис. 8. Диаграмма энергопотребления двух тяговых секций ЭВС16

• более высокие значения силы тяги у ДПМ приводили к более частым срабатываниям защиты от юза и боксования, особенно это проявлялось в зимние месяцы эксплуатации при температурах окружающей среды ниже -20°C ;

• на электропоезде, полностью обору-дованном ДПМ, требуется дальнейшая оптимизация алгоритмов защиты от юза и боксования для оптимального использования сил тяги и торможения.

Литература

1. Лысов Н. В., Брагин А. Г., Володин А. А., Иващенко В. О. Проблема электрокоррозии буксовых подшипников электропоездов «Сапсан» // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019, № 5, с. 28–32.
2. Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав: Монография / В. А. Гапанович, А. А. Андреев, Д. В. Пегов и др.; под ред. В. А. Гапановича. – СПб.: Издательство ООО Типография «НП-Принт», 2014, с. 77–78.

Брагин Александр Геннадьевич

Родился в 1967 году. В 1994 году окончил ПГУПС по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта», в 2011 году – Академию методов и техники управления (ЛИМТУ) Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики по специальности «Эксплуатация аппаратно-программных комплексов ПЭВМ и сетей на их основе». Кандидат технических наук. В 2001 году защитил диссертацию по теме «Ограничение бросков тока в тяговом приводе электроподвижного состава с микропроцессорным управлением импульсным регулятором напряжения». Опыт работы – 33 года. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 12 научных публикаций.

Иващенко Валерий Олегович

Родился в 1965 году. В 1988 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Кандидат технических наук, доцент. В 2001 году защитил диссертацию по теме «Алгоритмизация определения энергосберегающих режимов ведения пригородных электропоездов постоянного тока». Опыт работы – 31 год. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 38 научных трудов, 1 патент.

Лысов Николай Владимирович

Родился в 1973 году. В 1999 году окончил ПГУПС по специальности «Локомотивы (электровозы и электропоезда)». Кандидат технических наук. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Снижение влияния на рельсовые цепи тягового привода электропоезда с автономным инвертором тока». Опыт работы – 27 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет 15 научных трудов и 1 патент.

Марков Кирилл Викторович

Родился в 1994 году. В 2016 году окончил ПГУПС по специальности «Подвижной состав железных дорог». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает ассистентом на кафедре «Электрическая тяга» ПГУПС.

Bragin Alexander

Was born in 1967. In 1994 he graduated from PGUPS with a degree in "Electrification of rail transport", in 2011 from the Academy of Management Methods and Techniques (LIMTU) of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics with a degree in "Operation of IBM PC hardware and software systems and networks based on

them". Candidate of engineering sciences. In 2001 he defended the thesis on the topic "Limitation of in-rush of current in pulling drive of microprocessor-controlled electric motive power and switch regulator of voltage". Work experience is 33 years. At present he works as associate professor of Electric operation department of PGUPS. He has 12 scientific publications.

Ivashchenko Valeriy

Was born in 1965. In 1988 he graduated from Leningrad State Transport University majoring in "Electrification of rail transport". Candidate of engineering sciences, associate professor. In 2001 he defended the dissertation with topic "Detection algorithmization of energy saving mode of direct current suburban electric train maintaining". He has 31 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric operation department of PGUPS. He has 38 scientific publications, 1 patent.

Lysov Nikolay

Was born in 1973. In 1999 he graduated from PGUPS majoring in "Railroad engines (electric locomotives and electric multiple-unit trains)". Candidate of engineering sciences. In 2004 he defended the dissertation with topic "Reducing of influence on signal track circuit of pulling drive of electric multiple-unit train with self-commutated inverter of current". He has 27 years of work experience. At present he works as associate professor of Electric operation department of PGUPS. He has 15 scientific works and 1 patent.

Markov Kirill

Was born in 1994. In 2016 he graduated from the PGUPS with a degree in "Rolling stock of Railways". Work experience is 3 years. At present he is a works as an assistant at the Department of electric traction of PSUPS.

Сведения об авторах

Д.т.н., профессор
Сарбаев Владимир Иванович
+7-919-998-39-39

К.т.н., доцент
Андреев Валерий Васильевич
+7-916-232-24-73

Д.т.н., профессор
Герман Леонид Абрамович
+7-908-769-94-26

К.т.н., доцент
Яковлев Вадим Фридрихович
+7-960-832-01-38

Ле Ван Тунг
+7-906-254-94-68

Евстафьева Марина Валерьевна
+7-812-457-85-36

Афанасьев Михаил Михайлович
+7-925-821-59-80

К.т.н., доцент
Незевак Владислав Леонидович
+7-913-148-55-13

Д.т.н., профессор
Власьевский Станислав Васильевич
+7-914-547-54-47

К.т.н.
Брагин Александр Геннадьевич
+7-921-945-23-40

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

Авторские материалы. Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **6 000 руб.**, в т.ч. НДС 20%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20 e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2020 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей;

4-я страница обложки – 30 000 рублей;

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей.

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.