

В. В. Сироткин

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ *

Аннотация. Рассмотрены наиболее эффективные способы экономии топливно-энергетических ресурсов, используемых на железнодорожном транспорте. Предложена система дополнительного питания тяговой сети (система ДПТС), которая позволяет объединить наиболее перспективные энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Благодаря использованию нетрадиционного источника энергии и современного электромеханического преобразователя вентильно-индукторного типа, подключенного к тяговой железнодорожной сети, обеспечивается вторичное использование энергии рекуперации, улучшается качество работы системы тягового электроснабжения путем выравнивания напряжения в тяговой железнодорожной сети, а также снижаются потери энергии благодаря более коротким контурам протекающих токов. С использованием программного комплекса MATLAB/Simulink выполнен расчет одного из вариантов совместной работы предлагаемой системы ДПТС и тяговой железнодорожной сети.

Ключевые слова: энергоэффективность, электрический подвижной состав, система тягового электроснабжения, вентильно-индукторный генератор, инерционный накопитель энергии, рекуперативное торможение, имитационное моделирование.

Для цитирования: Сироткин, В. В. Эффективное использование энергии рекуперации в тяговой сети электроснабжения / В. В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_100.

Введение

Железнодорожный транспорт всегда был и остается крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов, на приобретение которых компания ОАО «РЖД» расходует сотни миллиардов рублей в год. Поэтому разработка методов, способов и средств снижения затрат энергии на тягу поездов является актуальной задачей для дальнейшей эффективной деятельности компании.

В Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года обособлена необходимость «сокращения удельного расхода топлива и электроэнергии на тягу поездов...», а также реализация «возможности применения на локомотиве нескольких источников энергии» [1].

В связи с постоянным увеличением цен на электрическую энергию специалисты железнодорожной отрасли, инженеры и ученые научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро разрабатывают комплексы мер, которые направлены на снижение и экономию энергетических затрат.

Для экономии электроэнергии в сфере перевозочного процесса применяются различные способы, такие как: использование тягового оборудования, имеющего более высокий номинальный коэффициент полезного действия (КПД); применение системы автоматизированного ведения тягового подвижного состава при выборе энергооптимального режима движения без отклонений от расписания и с соблюдением безопасности пассажиров и перевозимых грузов; применение рекуперативного торможения на электрифицированных участках железнодорожных путей; создание и внедрение тягового подвижного состава нового поколения (например, локомотивов на газомоторном топливе); применение двенадцатипульсовой схемы выпрямления, которая позволяет преобразовывать переменный ток в постоянный на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог; внедрение современных автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии с централизованным управлением; модернизация схем системы электроснабжения тяговых и нетяговых нужд по критериям энергоэффективности; разработка интеллектуальных систем управления тяговым электроприводом локомотивов; разработка и использование новых высококачественных смазочных материалов с различными присадками, эффективно воздействующими на величину потребляемых топливно-энергетических ресурсов.

* Работа выполнена в рамках гранта банка ВТБ (ПАО) на выполнение молодыми учеными научных работ по теме «Повышение эффективности рекуперативного торможения электрического подвижного состава за счет использования инерционных накопителей энергии».

Все перечисленные выше способы имеют достоинства и недостатки, которые подробно изложены в коллективном научном труде ученых и специалистов железнодорожной отрасли [2]. В целом любой из этих способов позволяет снизить энергетические затраты, но требует постоянного технического обслуживания и ремонта для сохранения работоспособного состояния оборудования.

Для поддержания конкурентоспособности и рентабельности услуг железнодорожного транспорта грузового или пассажирского сообщения необходимо применять комплексные технические решения, в которых будут объединены существующие способы и технологии энергосбережения с соблюдением обязательных требований в области охраны окружающей среды и экологии.

В последние годы трендом является применение комплексных технических решений с использованием современных средств электромеханики, в том числе в области железнодорожного транспорта, при этом получены существенные результаты, иногда сопровождаемые синергетическим эффектом, например, технические предложения, изложенные в [3, 4].

В настоящее время устройства электромеханики и преобразовательной техники интенсивно развиваются. Появляется возможность использовать современные достижения в этой области для дальнейшего развития энергосберегающих технологий для железнодорожного транспорта.

Одним из возможных путей эффективного решения поставленных задач по снижению энергозатрат на тягу поездов является использование нетрадиционных, экологически более безопасных источников электрической энергии для электроснабжения электрического подвижного состава (ЭПС), реализованных на базе перспективных электромеханических преобразователей.

Основная часть

Предлагается объединить наиболее перспективные энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте в одной системе ДПТС. Такая система ДПТС (рис. 1) содержит в себе вентильно-индукторную машину (ВИМ), работающую как генератор (ВИГ), вал которого через управляемую электромагнитную муфту (УЭММ) соединен с источником механической энергии. В качестве такого источника может выступать устройство, преобразовывающее энергию ветра (ветроэлектрическая установка (ВЭУ)) или энергию ниспадающего потока малых рек (гидроэлектростанция (ГЭС)).

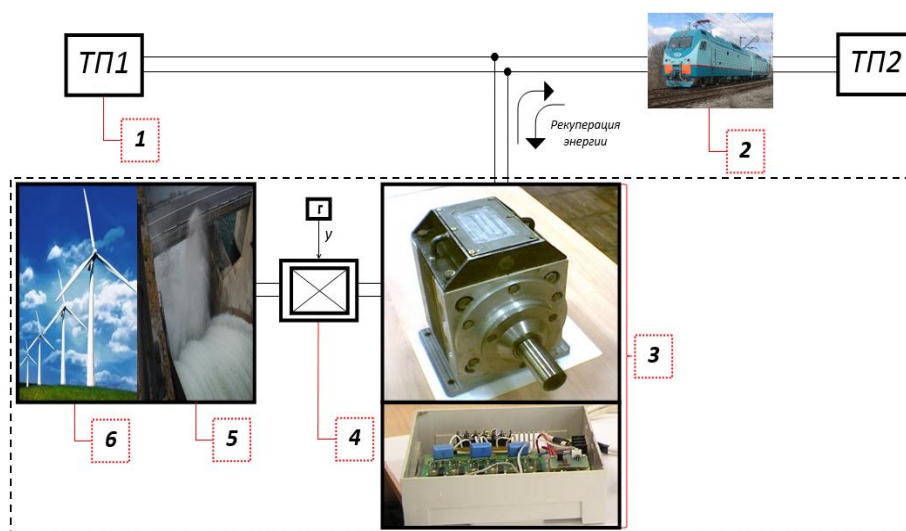


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой системы ДПТС:

- 1 – тяговые подстанции (ТП1, ТП2); 2 – электровоз; 3 – вентильно-индукторный генератор и система управления (ВИГ и СУ); 4 – управляемая электромагнитная муфта (УЭММ),
 у – управляющее воздействие; 5 – гидроэлектростанция (ГЭС);
 6 – ветроэлектрическая установка (ВЭУ)

Данная система ДПТС позволяет как генерировать электрическую энергию, так и накапливать ее во вращающемся роторе. В отличие от ранее предлагаемой конструкции [5], содержащей инерционный накопитель энергии на валу электрической машины, предлагается существенно упростить конструкцию путем передачи функции инерционного накопителя энергии ротору ВИМ. Ротор ВИМ пассивный (без обмотки), он позволяет выдерживать без разрушения высокие частоты вращения на уровне, достаточном для поглощения энергии рекуперации поезда, объем которой зависит на спусках от величины уклона, продолжительности спуска и массы поезда, а на равнинных участках – от массы поезда и скоростного

режима при рекуперативном торможении [6, 7]. Применение рекуперативного торможения является эффективным, так как позволяет снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов. В литературе для конкретных участков имеется информация об объеме рекуперированной энергии. Например, в [8] сказано, что «...при снижении скорости электровозом постоянного тока от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном полный возврат электроэнергии в тяговую сеть составляет $A_3 = 676,3$ кВт·ч (при пройденном пути $L = 8\ 807$ м и массе поезда $m_n = 7\ 100$ т) и $A_3 = 198,0$ кВт·ч (при пройденном пути $L = 2\ 579$ м и массе поезда $m_n = 1\ 775$ т)». В [9] для участка Гойтх – Навагинская при проходе одного поезда отмечено, что «...запасенная энергия для последующего использования в тяге поездов составила 583 кВт·ч». Обобщенные данные об объемах рекуперированной энергии для различных регионов РФ даны в [10]. Вопросы возможности использования ротора ВИМ при высоких частотах вращения рассмотрены в [11].

В отличие от энергии, потребляемой от тяговой подстанции, закупочная стоимость рекуперированной энергии равна нулю, так как она является собственным вторичным ресурсом ОАО «РЖД». Энергия, накопленная во вращающемся роторе ВИМ, определенное время сохраняется и далее отдается в нужный момент поезду, следующему в режиме тяги. Это существенно повышает энергетическую эффективность тяговой системы электроснабжения.

В реальной эксплуатации ЭПС далеко не всегда поезд, идущий под уклон в режиме рекуперативного торможения, может эффективно использовать энергию рекуперации. Для этого на том же участке должен проходить поезд в тяговом режиме либо ближайшие тяговые подстанции должны быть оборудованы инверторными преобразователями для возврата энергии в единую энергетическую систему. Оба варианта не всегда возможны. К тому же энергия, возвращаемая в единую энергетическую систему с помощью инверторных преобразователей, получается низкого качества из-за использования силовых полупроводниковых ключей. Использование рекуперативного торможения на ЭПС сопровождается рядом проблем, широко освещаемых в литературе [12, 13].

При подключении системы ДПТС к сети тягового электроснабжения появятся регулировочные возможности для улучшения качества питания ЭПС. Такую систему целесообразно располагать между тяговыми подстанциями в полосе отвода тяговой сети. Наиболее эффективно систему ДПТС можно использовать для тяговой сети постоянного тока с номинальным напряжением 3 кВ, поскольку для этого не требуется включать в силовую цепь промежуточные сложные преобразовательные и согласующие устройства.

Россия обладает развитой сетью железных дорог общей протяженностью более 120 тыс. км. Профиль путей и режимы следования подвижного состава могут быть самыми разными. Поэтому алгоритм работы предлагаемой системы ДПТС на различных участках железных дорог не может иметь жесткую архитектуру и быть заранее заданным. В данном случае целесообразно использовать так называемую технологию Smart Grid («умная сеть»), которая интенсивно используется в развитых странах и является перспективной для электрических сетей. При этом система ДПТС гибко подстраивается под работу тяговой электрической сети в зависимости от сложившейся ситуации, позволяет осуществлять самомониторинг и предоставлять полную информацию о произведенной и поглощенной энергии рекуперации в плане эффективности, потерь или экономической выгоды.

Согласно структурной схеме, представленной на рис. 1, предусматривается следующий алгоритм работы системы ДПТС, осуществляемый по сигналам датчика напряжения тяговой сети: при отсутствии ЭПС на участке система ДПТС вырабатывает электроэнергию от ВЭУ 6 и через тяговую сеть и инверторные преобразователи на тяговой подстанции (ТП1 или ТП2) отдает энергию системе внешнего электроснабжения. При появлении электровоза 2 (или электропоезда) работа системы ДПТС позволяет дополнительно поставлять электроэнергию тяговым электродвигателям по короткому контуру, снижая потери энергии на активных сопротивлениях тяговой сети. В случае перехода электровоза 2 в режим рекуперативного торможения, когда отсутствуют другие электровозы, следующие в режиме тяги, срабатывает УЭММ 4, отсоединяет вал ВИГ 3 от ВЭУ 6, ВИГ переходит в двигательный режим и поглощает энергию рекуперации, накапливая ее во вращающемся роторе. При завершении рекуперации и переходе в режим тяги электровоза 2 накопленная во вращающемся роторе энергия возвращается электровозу через тяговую сеть. После того как частота вращения ротора снизится до частоты вращения ВЭУ 6, УЭММ 4 восстанавливает механическое соединение ротора ВИГ 3 и ВЭУ 6. Таким образом система ДПТС работает непрерывно с полезным эффектом [14].

Рекомендации по установленной мощности ВЭУ для работы в составе тяговой сети с учетом профиля пути, интенсивности движения и средней скорости ветра на рассматриваемом участке Белореченская – Комсомольская даны в [15]. Мощность ВЭУ по предварительным расчетам составила 800 кВт.

Количество ВИГ для генерации энергии в тяговую сеть и приема энергии рекуперации может быть разным в зависимости от эксплуатационных условий на конкретном участке. При необходимости увеличить объем запасаемой энергии при рекуперации поезда к ротору присоединяются дополнительные массы, величина которых определяется расчетным путем в зависимости от конкретной ситуации с энергией рекуперации [14].

ВИГ сохраняет высокие технико-экономические параметры при изменении частоты вращения вала в достаточно широком диапазоне. Это является одним из основных преимуществ ВИГ при работе от ВЭУ.

Переход из двигательного режима в генераторный и наоборот осуществляется IGBT-транзисторами по сигналам системы управления путем подключения обмотки к тяговой сети в зависимости от положения зубцов статора по отношению к зубцам ротора. Если зубцы статора и ротора находятся в рассогласованном положении (зубец находится напротив паза), начинается двигательный режим работы, продолжающийся до согласованного положения, когда оси зубцов статора и ротора совпадают. После достижения согласованного положения начинается генераторный режим работы, который продолжается до рассогласованного положения. Переход от одного режима к другому может быть осуществлен за один такт коммутации силовых полупроводниковых ключей, что позволяет оперативно распоряжаться накопленной энергией [16].

Предлагаемая система ДПТС может быть использована не только на участках с уклонами, но и на равнинных участках железной дороги, в этом случае осуществляется торможение с рекуперацией энергии при подходе к кривым участкам или при подходе к зонам ограничения скорости. А поскольку такие ситуации встречаются довольно часто, то, суммируя небольшие порции энергии, можно получить существенный конечный результат, соизмеримый с движением по длительному уклону. При этом нет необходимости накапливать значительное количество энергии в роторе электрической машины и долго хранить энергию, она сразу же возвращается, как только электровоз после очередного генераторного торможения перешел в режим тяги. Это позволит свести к минимуму использование фрикционного тормоза.

Систему ДПТС также целесообразно располагать на железнодорожных станциях. Рассмотрим конкретный случай. Пусть грузовой поезд массой 3 000 т, двигаясь со скоростью 80 км/ч по участку Белореченская – Комсомольская, снижает скорость в режиме рекуперативного торможения до 60 км/ч перед криволинейным участком железной дороги. Изменение кинетической энергии поезда определялось согласно выражению [14]:

$$\Delta E_{\text{к.п.}} = \frac{Q_{\text{бр}}}{2} \left(\left(\frac{V_1}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{V_0}{3,6} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где $Q_{\text{бр}}$ – масса брутто поезда, кг;

$V_{0,1}$ – скорость поезда (начальная и конечная), км/ч.

$$\Delta E_{\text{к.п.}} = \frac{Q_{\text{бр}}}{2} \left(\left(\frac{V_1}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{V_0}{3,6} \right)^2 \right) = \frac{3 \cdot 10^6}{2} \left(\left(\frac{80}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{60}{3,6} \right)^2 \right) = 324\,074 \text{ кДж.}$$

Изменение кинетической энергии составит 324 074 кДж, что эквивалентно энергии 90,0 кВт·ч (1 кВт·ч соответствует 3 600 кДж). Если эта энергия будет отдана в тяговую сеть при рекуперации, то для тяги поезда можно будет использовать лишь часть этой энергии ввиду наличия потерь, которые включают в себя [14]:

1) потери электроэнергии при ее передаче от электровоза накопителям энергии (ВИМ), $\eta_{\text{сеть1}}$, в работе принято 85 %;

2) потери в ВИМ в процессе преобразования электрической энергии в механическую энергию вращения ротора $\eta_{\text{вид}}$, принято 94 %;

3) потери в ВИМ в процессе преобразования механической энергии вращения ротора обратно в электрическую $\eta_{\text{ВИГ}} = \eta_{\text{вид}} = 94$ %;

4) потери электроэнергии при ее передаче обратно от накопителей энергии (ВИМ) электровозу, $\eta_{\text{сеть2}} = \eta_{\text{сеть1}} = 85$ %.

В итоге с учетом КПД тяговой сети $\eta_{\text{сеть1}}$ и КПД преобразования электрической энергии в механическую $\eta_{\text{вид}}$ ротор одного ВИМ должен накопить механическую энергию $E_{\text{к.рот.}}$ в своей инерционной массе в объеме

$$E_{\text{к.рот.}} = \Delta E_{\text{к.п.}} \cdot \eta_{\text{сеть1}} \cdot \eta_{\text{ВИД}}; \quad (2)$$

$$E_{\text{к.рот.}} = 324\,074 \cdot 0,85 \cdot 0,94 = 258\,935 \text{ кДж.}$$

Количество ВИМ $N_{\text{ВИМ}}$ может варьироваться в зависимости от различных обстоятельств (в работе принято $N_{\text{ВИМ}} = 2$). Расчет необходимой для поглощения энергии рекуперации угловой скорости ω ротора каждого механического накопителя энергии был основан на формуле кинетической энергии вращательного движения:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{к.рот.}}}{J \cdot N_{\text{ВИМ}}}}, \quad (3)$$

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \omega, \quad (4)$$

где J – момент инерции привода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; в работе принято $J = 15,7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Расчет момента инерции ротора J был выполнен в программе FEMM с учетом геометрических размеров активной части ротора, его вала и вращающихся элементов привода. Плотность всех масс ротора и привода была принята $7,8 \text{ т/м}^3$.

Угловая скорость ω ротора и частота вращения ротора n каждого накопителя составляют соответственно:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 258\,935 \cdot 10^3}{15,7 \cdot 10^3 \cdot 2}} = 128,42 \text{ рад/с;}$$

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot 128,42 = 1\,226,32 \text{ об/мин.}$$

Автором также был выполнен расчет на прочность ротора с исходными данными: радиус ротора – 841 мм, длина пакета электротехнической стали – 2 850 мм. Напряжение растяжения $\sigma_{\text{раст.}}$, вызванное силами инерции при вращении, в наиболее уязвимом месте машины – спинке ротора составило 67,6 МПа при предельно допустимом напряжении $[\sigma] = 330 \text{ МПа}$ [17], что свидетельствует о коэффициенте запаса прочности 4,88. Указанные расчетные данные соответствуют ВИМ с соотношением зубцовой зоны статора и ротора 12/14.

Ниже рассмотрен достаточно напряженный вариант совместной работы ВИМ мощностью 1 200 кВт и тяговой железнодорожной сети, при котором электровоз (2ЭС4К «Дончак») движется между тяговыми подстанциями, а ВИМ работает как генератор с полной отдачей в номинальном режиме. Также приняты следующие допущения:

1) профиль пути без уклонов;

2) тяговые двигатели электровоза работают в номинальном режиме на всем межподстанционном расстоянии без каких-либо переключений.

Электровоз типа 2(3)ЭС4К «Дончак» с коллекторным тяговым приводом предназначен для вождения грузовых поездов массой более 6 000 тонн (выпущен на Новочеркасском электровозостроительном заводе).

Расчетная электрическая схема представлена на рис. 2 и включает в себя компоненты двух тяговых подстанций, контактной сети, рельсовых цепей и двух ВИМ для генерации энергии в тяговую сеть и приема энергии рекуперации, расположенных между тяговыми подстанциями. Расчеты были выполнены в программном комплексе (ПК) MATLAB/Simulink, который позволяет с достаточно высокой точностью производить расчеты сложных электротехнических систем.

На рис. 3 представлена схема замещения при проведении расчетов в ПК MATLAB/Simulink.

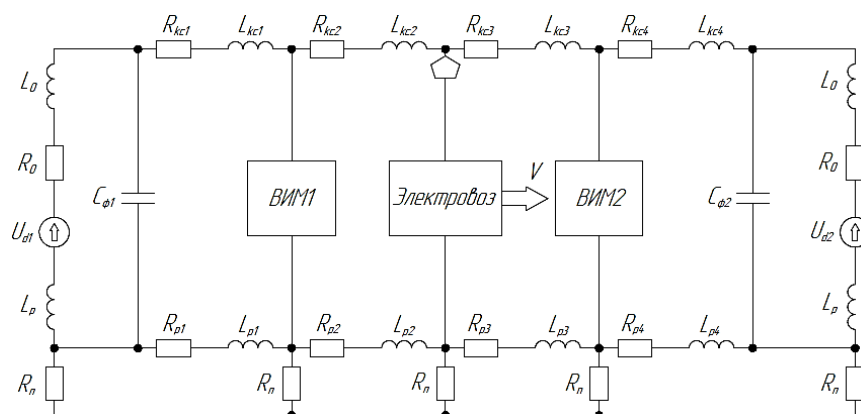


Рис. 2. Электрическая схема замещения:

$R_{к1}-R_{к4}$ – активные сопротивления проводов контактной подвески;

$L_{к1}-L_{к4}$ – индуктивные сопротивления проводов контактной подвески;

$R_{р1}-R_{р4}$ – активные сопротивления участков рельсовых цепей; $L_{р1}-L_{р4}$ – индуктивные сопротивления участков рельсовых цепей; $U_{d1}-U_{d2}$ – источник напряжения в месте подсоединения тяговой сети;

R_0 – внутреннее активное сопротивление источника;

L_0 – внутреннее реактивное сопротивление источника; L_p – индуктивность реактора; $R_{п}$ – переходное сопротивление «рельс – земля»; $C_{φ1}, C_{φ2}$ – емкость конденсаторов фильтра; ВИМ1,

ВИМ2 – электрические машины для генерации энергии в тяговую сеть и приема энергии рекуперации

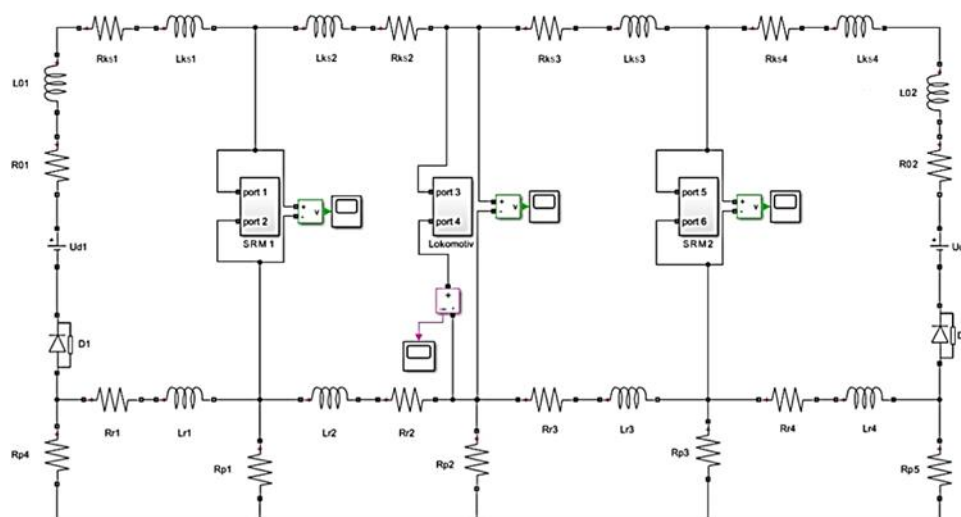


Рис. 3. Расчетная схема в ПК MATLAB/Simulink:

SRM1 и *SRM2* – расчетные подсистемы ВИМ, включающие встроенные блоки библиотеки Simulink;

Lokomotiv – расчетная подсистема имитационного моделирования электрической схемы электровоза 2ЭС4К «Дончак»

Целью расчета являлось определение напряжения на токоприемнике электровоза при прохождении расстояния между тяговыми подстанциями с работающей ВИМ и без нее. Поскольку параметры тяговой сети $R_{к1}-R_{к4}$, $L_{к1}-L_{к4}$, $R_{р1}-R_{р4}$, $L_{р1}-L_{р4}$ (см. рис. 2) меняются по мере перемещения электровоза, то данные о напряжении определялись итерационным путем. При этом весь межподстанционный участок в 12 км был разбит на ряд более мелких участков и напряжение на пантографе электровоза определялось на границах участков.

Результаты расчетов представлены на рис. 4.

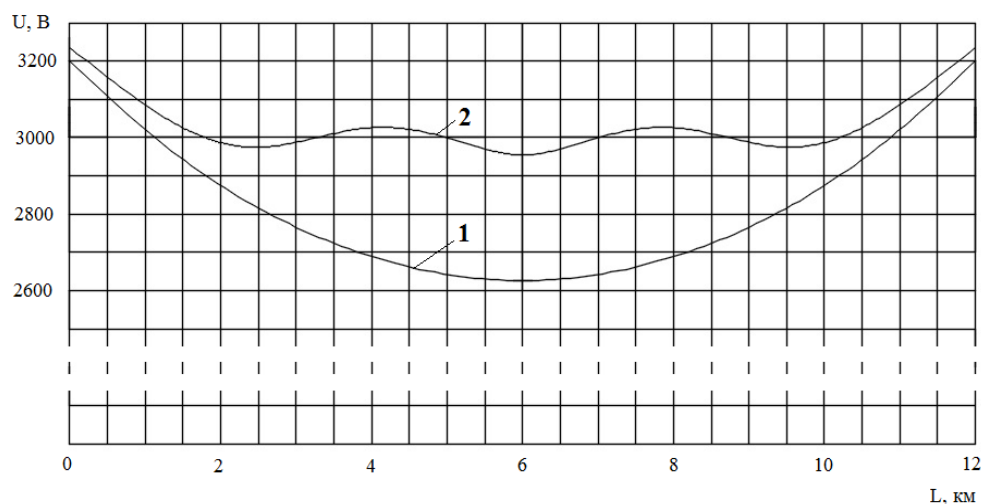


Рис. 4. Изменение напряжения на расчетном участке:

1 – напряжение без работающей ВИМ; 2 – напряжение с двумя работающими ВИМ, расположенными на 4-м и 8-м километре

Как видно из рис. 4, две работающие ВИМ, которые расположены на 4-м и 8-м километре, позволяют существенно скомпенсировать падение напряжения в тяговой сети при прохождении электровозом расчетного участка. Такая ситуация возможна только при благоприятных условиях по величине энергии ветрового потока, позволяющей работать ветрогенераторам с расчетной мощностью. В общем случае положительный эффект можно оценить, только выполнив технико-экономические расчеты с учетом ряда факторов [10]:

- 1) среднегодовой энергии ветрового потока на расчетном участке;
- 2) графика движения и массы поездов;
- 3) профиля пути;
- 4) мощности и количества работающих ВИМ, а также их расположения на участке между тяговыми подстанциями;
- 5) величины капитальных затрат на создание таких систем ДПТС;
- 6) стоимости электроэнергии и ряда других факторов.

Выводы

Предложена система ДПТС, позволяющая эффективно использовать энергию рекуперации. Она содержит в себе электрическую машину вентильно-индукторного типа, работающую как генератор, ротор которого способен не только участвовать в электромеханическом преобразовании энергии, но и накапливать в своей инерционной массе энергию от поезда, следующего в режиме рекуперативного торможения, и отдавать накопленную энергию обратно в нужные моменты.

Система ДПТС дает возможность совместить энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте, которые обычно применяются раздельно. За счет этого контуры токов, питающих тяговые электродвигатели ЭПС, получаются более короткими, уменьшая потери электроэнергии; обеспечивается вторичное использование энергии рекуперации; происходит выравнивание напряжения в тяговой сети, что положительно сказывается на тяговых характеристиках ЭПС; энергия, поступающая от ВИГ, не содержит в себе углеродного следа, т.е. является более экологически чистой.

В случае наличия на тяговых подстанциях инверторных преобразователей вся выработанная генератором электроэнергия может быть передана во внешнюю сеть электроснабжения, даже в том случае, если на участке нет движения поездов.

Предлагаемая к использованию система ДПТС может работать автономно в автоматическом режиме.

Список литературы

1 Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» до 2030 года. – URL: <http://doc.rzd.ru/doc/pub->

References

1 Development strategy of the Russian Railways holding until 2030. – URL: <http://doc.rzd.ru/doc/pub->

lic/ru/kbshzd/rzd?STRUC-TURE_ID=704&layer_id=5104&id=639 (дата обращения: 13.05.2024).

2 Энергосбережение на железнодорожном транспорте : справочно-методическое издание (Серия 2. Энергоэффективность по отраслям) / под редакцией В. А. Гапановича. – Москва : Интехэнерго-Издат : Теплоэнергетик, 2014. – 304 с. – ISBN 978-5-98385-013-2.

3 **Voron, O. A.** Methodology for the development of innovative isothermal rolling stock in the country's transport system : специальность 05.22.07, 05.22.01 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ворон Олег Андреевич. – Ростов-на-Дону, 2021. – 401 с.

4 **Khatlamadzhiyan, A. E.** Применение современных цифровых технологий и технических средств для повышения безопасности и эффективности перевозочного процесса подвижного состава / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Яицков, И. А. Степин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 107–110. – ISSN 1818-5509.

5 **Petrushin, A. D.** Повышение энергетической эффективности подвижного состава железных дорог с учетом требований экологии / А. Д. Петрушин, И. В. Волков, С. С. Черняев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 **Krishnan, R.** Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan. – Virginia : The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, 2001. – 416 p. – ISBN 9781315220062.

7 **Petrushin, A. D.** Исследование взаимосвязи электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя и геометрических элементов его магнитной системы / А. Д. Петрушин, А. В. Шевкунова, В. Ю. Смачный // Вестник ЮУрГУ. – (Серия «Энергетика»). – 2020. – Том 20. – № 2. – С. 127–137. – DOI 10.14529/power200212.

8 **Baklanov, A. A.** Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов / А. А. Бакланов, А. П. Шилияков // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 11–22. – ISSN 2220-4245.

9 **Petrushin, D. A.** Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока путем использования в тяговой сети инерционного накопителя энергии со встроенной вентильно-индукторной электрической машиной : специальность 05.22.07 : диссертация на

lic/ru/kbshzd/rzd?STRUC-TURE_ID=704&layer_id=5104&id=639 (date of access: 05/13/2024).

2 Energy saving in railway transport: a reference and methodological publication. Series 2. Energy efficiency by industries / Edited by V. A. Gapanovich. – Moscow : «Intekhenergo-Izdat» : «Teploenergetik», 2014. – 304 p. – ISBN 978-5-98385-013-2.

3 **Voron, O. A.** Methodology for the development of innovative isothermal rolling stock in the country's transport system : diss. Dr. Tech. Sciences : 05.22.07, 05.22.01 / Voron Oleg Andreevich. – Rostov-on-Don, 2021. – 401 p.

4 **Khatlamadzhiyan, A. E.** Using of modern digital technologies and technical means for increasing of safety and efficiency rolling stock transportation process / A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Yaitskov, I. A. Stepin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 107–110. – ISSN 1818-5509.

5 **Petrushin, A. D.** Improving the energy efficiency of railway rolling stock, taking into account environmental requirements / A. D. Petrushin, I. V. Volkov, S. S. Chernyaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 **Krishnan, R.** Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan. – Virginia : The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, 2001. – 416 p. – ISBN 9781315220062.

7 **Petrushin, A. D.** Electromagnetic torque of switched-reluctance motors and its correlation with the magnetic system geometry / A. D. Petrushin, A. V. Shevkunova, V. Yu. Smachny / Bulletin of the South Ural State University. Ser. : Power Engineering. – 2020. – Vol. 20. – No. 2. – P. 127–137. – DOI 10.14529/power200212.

8 **Baklanov, A. A.** Energy efficiency of regenerative braking of freight electric locomotives / A. A. Baklanov, A. P. Shilyakov // Izvestia Transsib. – 2021. – No. 4 (48). – P. 11–22. – ISSN 2220-4245.

9 **Petrushin, D. A.** Increasing the efficiency of regenerative braking of DC electric locomotives by using an inertial energy storage device with a built-in switched-reluctance electric machine in the traction network : diss. Cand. Tech. Sciences : 05.22.07 / Petrushin Dmitry Alexandrovich. – Rostov-on-Don, 2013. – 129 p.

соискание ученой степени кандидата технических наук / Петрушин Дмитрий Александрович. – Ростов-на-Дону, 2013. – 129 с.

10 **Черняев, С. С.** Технико-экономическое обоснование внедрения ветроэнергетической установки на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока с благоприятными ветровыми условиями / С. С. Черняев, В. В. Сироткин // Механика и трибология транспортных систем : сборник статей международной научной конференции «МехТрибоТранс-2021», Ростов-на-Дону, 09–10 ноября 2021 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 104–110. – DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021104.

11 **Петрушин, Д. А.** Моделирование режимов работы системы тягового электроснабжения с инерционным накопителем энергии / Д. А. Петрушин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1 (37). – С. 114–118. – ISSN 0201-727X.

12 **Незевак, В. Л.** Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах производственной зоны мониторинга участка постоянного тока / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба. – 2015. – № 2. – С. 87–95. – ISSN 2220-4245.

13 Об утверждении методики планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо : распоряжение ОАО «РЖД» от 15 января 2013 г. № 44р. – Москва : ОАО «РЖД». – 14 с.

14 **Сироткин, В. В.** Расчет механической прочности ротора вентильно-индукторного генератора, подключенного к тяговой железнодорожной сети / В. В. Сироткин, А. В. Кашуба // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт : наука, образование, производство», Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года. – Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 86–90. – ISBN 978-5-907295-90-2.

15 Определение мощности ветроэнергетической станции при ее работе в системе тягового электроснабжения постоянного тока / С. С. Черняев, В. В. Сироткин, М. Ю. Колмыкова [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (56). – С. 55–61. – ISSN 1818-5509.

16 **Ворон, О. А.** Обоснование использования вентильно-индукторных электрических машин для управления потоком энергии рекуперации электрического подвижного состава / О. А. Ворон, В. В. Сироткин, А. Д. Петрушин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Том 66. – № 4. – С. 34–39. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-4-34-39.

10 **Chernyaev, S. S.** Technical and economic assessment for implementation of a wind power plant on DC railways areas with favorable wind conditions / S. S. Chernyaev, V. V. Sirotkin // Mechanics and tribology of transport systems (MechTribTrans-2021) : collection of articles of the international scientific conference, Rostov-on-Don, November 09–10, 2021. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2021. – P. 104–110. – DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_104.

11 **Petrushin, D. A.** Simulation the operating modes of tractive power supply systems with flywheel energy storage / D. A. Petrushin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 1 (37). – P. 114–118. – ISSN 0201-727X.

12 **Nezevak, V. L.** The monitoring of the execution of the specific regeneration's norms within the ambit of the arbitrary monitoring's area of the dc area / V. L. Nezevak, A. P. Shatokhin // Izvestiya Transiba. – 2015. – No. 2. – P. 87–95. – ISSN 2220-4245.

13 On approval of the methodology for planning and rationing energy recovery at the level of the operational locomotive depot : Order of Russian Railways. – January 15, 2013 No. 44r. – Moscow : JSC «Russian Railways». – 14 p.

14 **Sirotkin, V. V.** Calculation of the mechanical durability of the rotor of switched reluctance generator connected to the traction railway network / V. V. Sirotkin, A. V. Kashuba // Collection of scientific papers «Transport : science, education, production» : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 26–28, 2023. – Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 86–90. – ISBN 978-5-907295-90-2.

15 Calculation of windmill power when it is in operation in a direct current traction power supply system / S. S. Chernyaev, V. V. Sirotkin, M. Yu. Kolmykova [et al.] // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (56). – P. 55–61. – ISSN 1818-5509.

16 **Voron, O. A.** Justification of operation of switched reluctance motors to control the energy flow of electric rolling stock recuperation. / O. A. Voron, V. V. Sirotkin, A. D. Petrushin // News of higher educational institutions. Electromechanics. – 2023. – Vol. 66. – No. 4. – P. 34–39. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-4-34-39.

17 ГОСТ 21427.2-83. Межгосударственный стандарт. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009104> (дата обращения: 13.05.2024).

17 GOST 21427.2-83. Interstate standard. Steel electrical cold-rolled isotropic sheet. Specifications. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009104> (date of access: 05/13/2024).

V. V. Sirotkin

USAGE OF THE ENERGY RECOVERING EFFICIENCY IN THE ELECTRIC-TRACTION NETWORK

Abstract. The paper presents the most effective ways saving fuel and energy resources used in railway transport area. A system of additional power supply to the traction network has been proposed, which makes it possible to combine the most promising energy-saving technologies in railway transport. Due to the use of an unconventional energy source and a modern switched reluctance type electromechanical converter connected to the traction railway network, a guaranteed beneficial use of recovering energy is ensured, the quality traction power supply system is improved of operation by smoothing the voltage in the traction railway network, and energy losses are reduced due to shorter circuits of flowing currents. Using the “MATLAB/Simulink” software package, one of the options for collaboration work of the proposed device and the traction railway network was calculated.

Keywords: energy efficiency, electric rolling stock, traction power supply system, switched reluctance generator, inertial energy storage, recovering braking, simulation.

For citation: Sirotkin, V. V. Usage of the energy recovering efficiency in the electric-traction network / V. V. Sirotkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 100–109. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_100.

Сведения об авторах

Сироткин Вячеслав Викторович
Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
ассистент,
e-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

Information about the authors

Sirotkin Vyacheslav Viktorovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Cars and Car Facilities»,
Assistant,
e-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru