

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.333.41
DOI 10.17816/transsyst20239233-43

© Кузнецов А.А.¹, Изварин М.Ю.²

¹Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)

²Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Обоснование: Повышение эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе возможно при создании системы использования энергии рекуперации для отопления вагонов пассажирских поездов.

Цель: создание системы, позволяющей использовать энергию вырабатываемую электровозом постоянного тока при рекуперативном торможении и отсутствии потребителя в тяговой сети с целью отопления пассажирских вагонов.

Материалы и Методы: анализ статистических данных и публикаций по использованию рекуперативного торможения, анализ известных схмотехнических решений в области систем отопления пассажирских вагонов.

Результаты работы: разработаны принципы построения системы, повышающей эффективность рекуперации с преобразованием электрической энергии в тепловую и возможности ее накопления.

Заключение: Создание и внедрение описанной системы позволит повысить эффективность рекуперативного торможения и общую энергоэффективность перевозочного процесса на электрифицированных участках постоянного тока.

Ключевые слова: Электрический подвижной состав, рекуперативное торможение, высоковольтная подвагонная магистраль, комбинированное отопление.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Kuznetsov¹, M.Yu. Izvarin²

¹ Omsk State Transport University
(Omsk, Russia)

² Emperor Alexander I Petersburg Transport University
(St. Petersburg, Russia)

USE OF REGENERATIVE BRAKING ENERGY IN THE PASSENGER COACHES HEATING SYSTEM

Background: Increasing the efficiency of regenerative braking on sections of railways electrified at direct current is possible when creating a system for using recuperation energy for heating passenger coaches.

Aim: development of a system that allows using the regenerative braking energy under conditions absence of a consumer in the traction network for the purpose of heating passenger coaches.

Materials and Methods: analysis of the statistical data and publications on the use of regenerative braking, analysis of known circuit solutions in the area of passenger coaches heating systems.

Results: the principles of constructing a system that increases the efficiency of regenerative braking was developed.

Conclusion: The creation and implementation of the system for the use of regenerative braking energy will improve the efficiency of regenerative braking and the overall energy efficiency of the transportation process in areas electrified with direct current.

Key words: Electric rolling stock, regenerative braking, train high-voltage single-wire DC or AC main line, combined heating.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе как в России, так и в мире широко применяется рекуперативное торможение (рекуперация). Рекуперация имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как повышение энергоэффективности перевозок, электрическая и механическая устойчивость, что удобно для поддержания постоянной скорости на спусках, снижение расхода тормозных колодок и износа бандажей электрического подвижного состава (ЭПС). Современный подвижной состав с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) позволяет производить рекуперативное торможение до низких скоростей. Однако применение рекуперации на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе имеет ряд особенностей, связанных с использованием вырабатываемой тяговыми электродвигателями (ТЭД) энергии. Вопросы полезного использования энергии рекуперации рассмотрены в настоящей статье.

1. Возврат энергии при рекуперативном торможении. Чтобы проанализировать количественно возврат энергии в сеть, необходимо иметь статистические данные о возврате электроэнергии в сеть в результате рекуперативного торможения. К сожалению, ОАО «РЖД» не

раскрывает подобную статистику, однако среднее значение возврата энергии по отношению к потребленной на тягу, можно рассчитать по данным Федеральной службы государственной статистики «Росстат» и материалам из открытых источников [1, 2] и аналогичных. Год к году возврат энергии от применения рекуперации увеличивается (Рис.1), при этом сама оценка энергоэффективности выполняется как Российскими, так и международными организациями [3].

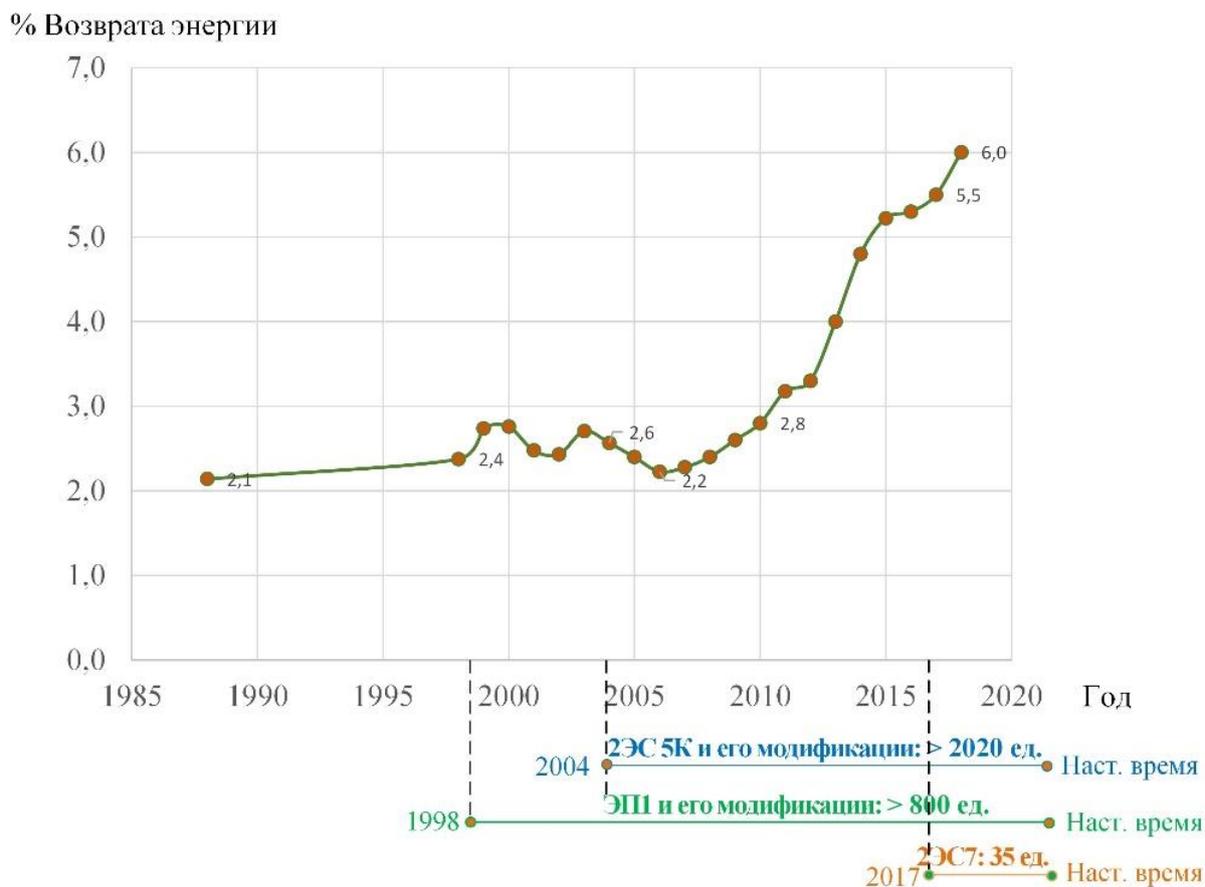


Рис. 1. Возврат энергии в контактную сеть на ж.д. транспорте РФ

Это связано, прежде всего, с внедрением современных электровозов переменного тока, в том числе с асинхронными тяговыми двигателями (на рисунке отмечен только выпуск массовых серий электровозов). Однако резервы далеко не исчерпаны – в мире имеются примеры возврата до 15 % и более энергии.

2. Особенности применения рекуперативного торможения на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе. К сожалению, применение рекуперативного торможения на постоянном токе требует наличия потребителя на участке секции контактной сети, либо инверторных преобразователей на тяговых подстанциях. Регулировочные торможения имеют небольшую продолжительность, часто менее 1 минуты, в течение которой ТЭД вырабатывают значительную

мощность, сопоставимую с часовой мощностью электровоза или электропоезда и достигающую до 6–7 тыс. кВт. Все чаще рекуперативное торможение применяется на пассажирских электровозах. Пример – двухсистемный электровоз ЭП20, работающий на постоянном токе [4, 5]. На участке с интенсивным движением поездов принять эту мощность не составляет труда – с большой вероятностью на участке находится поезд, работающий в режиме тяги. Такая ситуация характерна для МЦК, пригородных участков Москвы. Однако на участках с менее интенсивным движением рост напряжения на токоприемнике не приводит к росту тока ТЭД, так как подстанции с диодными выпрямителями не могут осуществить передачу энергии в энергосистему. При этом на ЭПС с рекуперацией происходит отключение торможения или переход на реостатное (ступенчатый или плавный, в зависимости от типа ЭПС). В любом случае, в этой ситуации использование энергии торможения становится невозможным. В литературе имеется описание большого количества систем, предназначенных для повышения эффективности рекуперации на участках постоянного тока с небольшим объемом движения. К ним относятся:

- установка инверторов на тяговых подстанциях;
- создание электрического соединения с соседними секциями контактной сети;
- использование энергии рекуперации для питания вспомогательных машин и систем электровозов;
- Установка накопителей энергии на ЭПС (гибридизация).

Установка инверторов на тяговых подстанциях является крайне затратным мероприятием, она выполняется только на подстанциях, расположенных на участках с затяжными спусками, на которых рекуперация осуществляется постоянно и отдача энергии значительная.

Электрическое соединение на постах секционирования возможно, однако мощность передачи на больших плечах в системе 3 кВ сильно ограничена.

Оборудование подвижного состава накопителями энергии позволяет применять рекуперацию независимо от наличия потребителя в контактной сети, однако это увеличивает массу ЭПС и в некоторых случаях может не повысить, а снизить энергетическую эффективность. Поэтому гибридизация с установкой накопителей применяется только в тех случаях, когда необходимо придать ЭПС какие-либо новые свойства, например автономный ход [6].

Использование энергии рекуперации для вспомогательных нужд на самом локомотиве возможно, однако вспомогательные потребители имеют небольшую мощность и не играют решающей роли в потреблении энергии рекуперации.

3. Использование энергии рекуперативного торможения для отопления. Энергию торможения вполне можно использовать для работы климатических установок электропоездов и пассажирских вагонов, имеющих мощность, сопоставимую с мощностью ТЭД электровозов и электропоездов, необходимо только синхронизировать их с процессом торможения, что вполне возможно реализовать с использованием современных технологий передачи информации. Идея использования системы отопления как нагрузки ТЭД при электрическом торможении не нова и применяется на некоторых типах троллейбусов и трамваев, но при реостатном торможении. В то же время современные нагреватели плохо подходят в качестве тормозных резисторов, так как рассчитаны на питание постоянным по величине напряжением, а использование штатных тормозных резисторов в качестве нагревателей не может обеспечить стабильный нагрев воздуха, вследствие чего такие системы не получили широкого распространения.

Большинство современных видов пассажирского подвижного состава имеют мощные системы электрического отопления, питающиеся от контактной сети. Пассажирские вагоны локомотивной тяги выпускаются с автономной, смешанной и централизованной высоковольтной системами электроснабжения, причем чаще используются две последние. При смешанной системе электроснабжения питание низковольтных потребителей (освещение, вентиляция, кипятильник, насосы, туалеты с управлением, иногда кондиционер и вспомогательное отопление) осуществляется от подвагонного генератора и аккумуляторной батареи по двухпроводной схеме с напряжением 52 В или 110 В постоянного тока [7–9]. Основное электрическое отопление получает питание от локомотива (электровоза или оборудованного дополнительным генератором тепловоза) по однопроводной высоковольтной подвагонной магистрали с напряжением 3 кВ как на участках как постоянного, так и переменного тока (Рис. 2).

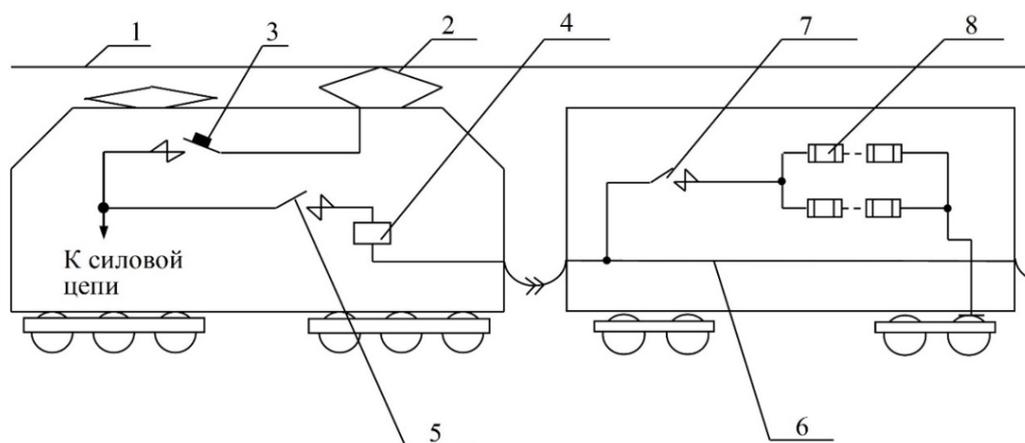


Рис. 2. Упрощенная схема высоковольтного отопления пассажирского поезда на участке постоянного тока

- 1 – контактная сеть постоянного тока с напряжением 3000В;
- 2 – токоприемник электровоза;
- 3 – быстродействующий выключатель (БВ);
- 4 – токовое реле;
- 5 – контактор отопления; магистраль (однопроводная) с напряжением 3000В;
- 7 – контактор отопления на вагоне;
- 6 – высоковольтная однопроводная магистраль
- 8 – высоковольтные электронагреватели нагреватели системы отопления вагона общей мощностью 48 кВт

На вагонах имеется высоковольтная схема с контакторами, аппаратурой автоматики и защиты. Потребителями являются высоковольтные трубчатые электронагреватели (ТЭНы) общей мощностью 48 кВт. Наиболее часто применяется комбинированное отопление водяного типа, а ТЭНы служат для подогрева воды в котле (котел можно отапливать и углем). Сухотопочный тип системы отопления широко используется в вагонах электропоездов. Кроме описанных, в последние годы все шире стала применяться централизованная высоковольтная система отопления, при которой все энергоснабжение вагонов осуществляется от электровоза по подвагонной магистрали с использованием преобразователей, а подвагонные генераторы не устанавливаются. Так как при таком типе электроснабжения вагон может эксплуатироваться только на электрифицированных участках, котел выполняется с чисто электрическим подогревом, без топки для угля. Таким образом, пассажирский поезд нормальной составности при работающем отоплении (осенне-зимний период) всегда имеет потребители общей мощностью 800–960 кВт. На вагонах с централизованной высоковольтной системой энергоснабжения имеется также установка кондиционирования мощностью 22–30 кВт, получающая питание от магистрали с напряжением 3 кВ. Отопление вагонов работает в режиме повторно – кратковременного включения, продолжительность включения (ПВ) зависит от температуры наружного воздуха и может изменяться от 10 до 80 %. Как правило, в отопительном котле установлены термодатчики, не допускающие повышения температуры более 92 °С, так как система комбинированного водяного отопления является открытой. При понижении температуры до 85 °С ТЭНы повторно включаются. Это предотвращает закипание воды в котле. Емкость системы водяного отопления составляет 850–950 литров, в зависимости от конструкции вагона.

С точки зрения электротехники, схема электровоза в режиме рекуперации с работающей системой отопления поезда представляет собой схему постоянного тока, в которой имеется узел, соединяющий 4 ветви: ветвь ТЭД или ТЭД с преобразователями, работающих в режиме генераторов (источника); ветвь токоприемника, подключенная к контактной сети, ветвь тормозных резисторов с импульсным

преобразователями и ветвь отопления вагонов (Рис. 3). Входящим является ток ТЭД, работающих в режиме генераторов, а исходящими – токи рекуперации в контактную сеть $I_{р.к.с}$, тормозного резистора $I_{рт}$, и ток отопления I_o .

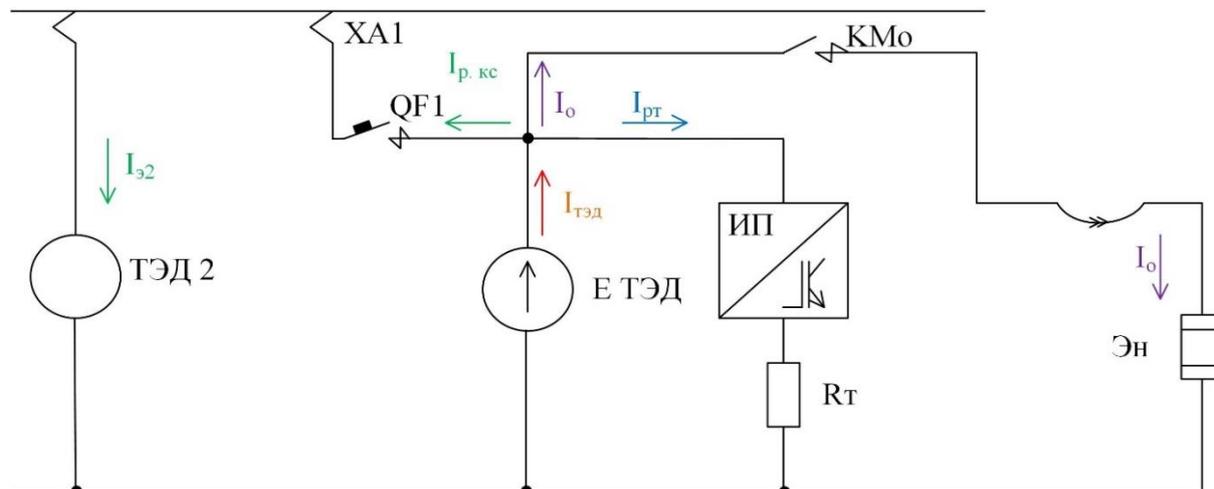


Рис. 3. Схема рекуперации:

Е ТЭД – тяговые двигатели рекуперирующего электровоза;

QF– БВ (или БК);

ИП – импульсный преобразователь;

Rт – тормозной резистор;

Эн – нагреватели системы отопления вагонов;

КМо – контактор отопления;

ТЭД2 – тяговые электродвигатели какого-либо электровоза в режиме тяги на той же секции контактной сети

При наличии в контактной сети потребителя в виде электровоза 2 (ТЭД2) с мощностью, равной или большей, чем мощность рекуперации и неработающем отоплении вагонов ток рекуперации $I_{р.к.с}$ имеет максимальное возможное значение, определяемой заданной машинистом рекуперирующего электровоза тормозной силой. Если электровоз 2 прекратит работу в режиме тяги, включается в работу импульсный преобразователь ИП, регулирующий ток тормозного резистора $I_{рт}$ таким образом, чтобы напряжение на токоприемнике XA1 не превышало 3,9 кВ. При этом в контактную сеть отдается максимально возможная по условию наличия потребителя энергия. Если в этот момент включить отопление, то в узле возникнет дополнительный исходящий ток отопления I_o , что позволит на эту же величину уменьшить ток тормозного резистора, так как входящий в узел ток определяется реализуемой тормозной силой.

Если несколько (на 5–7 %) снизить температуру срабатывания термодатчиков (термореле) котла, то это никак не скажется на работе системы отопления, однако создаст резерв для использования энергии рекуперации, используя теплоемкость системы отопления. При этом

защита от закипания воды в котле останется в работе. Таким образом, одновременно с режимом рекуперации от электровоза должен поступать сигнал о необходимости включения нагревателей системы отопления и циркуляционного насоса для лучшей теплопередачи. Вырабатываемая тяговыми двигателями энергия будет накапливаться в виде тепловой энергии, запасенной в системе водяного отопления. На современных электровозах, на которых при недостаточной нагрузке ток тормозных резисторов плавно увеличивается за счет работы импульсного преобразователя, эффект будет выражаться в виде уменьшения тока тормозных резисторов и увеличения тока высоковольтной подвагонной магистрали. При этом температура воды в котле повысится, и повторное включение отопления произойдет позже, что позволит уменьшить потребление энергии из контактной сети на отопление.

На вагонах с централизованной высоковольтной системой отопления можно также кратковременно увеличить интенсивность охлаждения, зарядный ток батареи, включить компрессор и другие потребители, позволяющие использовать энергию рекуперации. На современных вагонах в системе электрооборудования используется микропроцессорная система управления и диагностики (МСУД), поэтому вопрос изменения алгоритма работы контакторов решается ее простым перепрограммированием. Наиболее сложно обеспечить распознавание режима рекуперации, так как сигнал о её применении необходимо передать с электровоза (выявление повышения напряжения в подвагонной высоковольтной магистрали может говорить не только о применении рекуперации, но и просто о приближении поезда к тяговой подстанции).

Реализовать передачу сигнала от электровоза к вагонам можно с использованием технологической радиосвязи типа GSM-R [10,11], однако не все участки оборудованы такой системой. Поэтому лучше использовать систему передачи данных PLC, используемую для передачи информации по проводам ЛЭП [12]. Некоторое увеличение потребления энергии на передачу информации в данном случае не имеет значения, так как данная энергия все равно была бы рассеяна в тормозных резисторах.

Главным достоинством такой системы является отсутствие существенных затрат на модернизацию системы отопления (меняется только алгоритм). Данная система в таком виде пригодна только для пассажирских электровозов с рекуперативным торможением на постоянном токе, количество которых невелико. Чтобы использовать энергию рекуперации грузовых электровозов, необходимо разработать алгоритм выявления рекуперативного торможения и систему для его реализации, устанавливаемую на пассажирских вагонах. На электропоездах с рекуперативным торможением использовать предложенный принцип еще проще – необходимо всегда включать отопление при рекуперации (в осенне-зимний период), что легко

реализовать с помощью обычных релейных схем. При некоторых доработках систем торможения, принцип работы может использоваться и на пассажирских тепловозах, оборудованных высоковольтной подвагонной магистралью. Кроме того наличие канала связи PLC позволит решить и другие проблемы (например, обеспечение устойчивой связи между машинистом и начальником поезда на участках, не оборудованных радиосвязью, передачу телеметрической информации).

ВЫВОДЫ

1. Использование энергии рекуперации на постоянном токе затруднительно, так как связано с наличием потребителя в контактной сети.

2. В качестве дополнительного потребителя в контактной сети можно использовать систему отопления пассажирского поезда, необходимо только синхронизировать работу электронагревателей с рекуперативным торможением.

3. В качестве канала связи между электровозом и вагонами пассажирского поезда хорошие перспективы имеет система передачи данных PLC.

Библиографический список / References

1. Рекорд взят. Статья на официальном сайте газеты «Гудок» от 11.12.2011. [Rekord vzyt. Oficial'nyj sajt gazety "Gudok" ot 11.12.2011. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: <https://gudok.ru/content2/transport/zd/884553/>
2. Рекуперация в этом году бьет рекорды. Официальный сайт газеты «Гудок». [Rekuperaciya v ehtom godu b'yt rekordy. Oficial'nyj sajt gazety "Gudok" (In Russ.)]. Доступно по: <https://gudok.ru/newspaper/amp/?ID=1352219&archive=2016.10.06> Ссылка активна на 20.05.2023.
3. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Евстафьева М.В. Оценка энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т.14. – №1. – С.119–126. [Tytova TS, Yevstafiyev AM, Izvaryn MY, Yevstafiyeva MV. Assessment of energy efficiency of rail activity with the specific units of measurement application. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;14(1):119-126 (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29112744>
4. Электровоз магистральный ЭП20. Руководство по эксплуатации ЗТС.085.003 РЭ [Ehлектровоз magistral'nyj EHP20. Rukovodstvo po ehkspluatacii ZTS.085.003 REH]. Ссылка активна на 12.06.2023. Доступно по: it.su/techinfoV72.html
5. Смаглюков Д.А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20. (Учебное пособие). – М.: Российские железные дороги, 2015. – 360 с. [Smaglyukov DA. *Ustrojstvo i ehkspluatiya ehлектроvoza EHP20*. (Uchebnoe posobie). Moscow: Rossijskie zheleznyye dorogi; 2015. 360 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: <https://zlibrary-asia.se/book/3524030/9e7112>

6. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 2. // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 2(81). – С. 52–55. [Titova TS, Evstaf'ev AM, Izvarin MYu, Sychugov AN. Prospects for development of traction rolling stock. part 2. *Transport of the Russian Federation.* - 2019;2(81):52-55 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/xpzijq> Ссылка активна на 31.05.2023.
7. Егоров В.П. Устройство и эксплуатация цельнометаллических пассажирских вагонов. (Учебник для техн. училищ.) – М.: Высшая школа, 1984. – 232 с. [Egorov VP. *Ustrojstvo i ehkspluatiya cel'nometallicheskih passazhirskikh vagonov.* (Uchebnik dlya tekhn. uchilishch.) Moscow: Vysshaya shkola; 1984. 232 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://instructionsrdz.ucoz.ru/load/dlja_vagonnikov/egorov_v_p_ustrojstvo_i_ehkspluatiya_passazhirskikh_vagonov_dlja_provodnikov/11-1-0-509
8. Комаров Ю.И. Электрооборудование пассажирских вагонов локомотивной тяги нового поколения. Сб. науч. ст.: Подвижной состав 21 века: идеи, требования, проекты. – СПб: ПГУПС, 2001. – С. 114–123. [Komarov YuI. *Ehlektooborudovanie passazhirskikh vagonov lokomotivnoj tyagi novogo pokoleniya.* Sb. nauch. st.: Podvizhnoj sostav 21 veka: idei, trebovaniya, proekty. St. Petersburg: PGUPS; 2001. pp. 114-123 (In Russ.)].
9. Зорохович А.Е., Гаврилов Я.И., Реморов А.А., Кадуба Ю.Н. Электрооборудование вагонов. (Учебник для вузов железнодорожного транспорта). – М.: Транспорт, 1982. – 367 с. [Zorokhovich AE, Gavrilov YaI, Remorov AA, Kaduba YuN. *Elektrooborudovanie vagonov.* (Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta). Moscow: Transport; 1982. 367 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001104281>
10. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 1. // Беспроводные технологии. – № 1(58). – 2020. – С. 48–56. [Margaryan S. Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozhenij. Chast'1. *Wireless technologies.* 2020;1(58):48-56 (In Russ.)]. Доступно по: <https://wireless-e.ru/gsm/gsm-r/radioset-upravleniya-chast-1/> Ссылка активна на 12.06.2023.
11. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 2. // Беспроводные технологии. – № 2(59). – 2020. – С. 48–56. [Margaryan S. Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozhenij. Chast' 1. *Wireless technologies.* 2020;2(59):48-56. (In Russ.)]. Ссылка активна на 12.06.2023. Доступно по: <https://wireless-e.ru/application/railway/radioset-upravleniya-chast-2/>
12. Шишкин Ф.Д., Бростилов С.А., Трусов В.А. Технология Power Line Communication и ее применение // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. (Материалы семинара). – 2015. – № 18. – С. 402–406. [Shishkin FD, Brostilov SA, Trusov VA. *Tekhnologiya Power Line Communication i ee primenenie. Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh.* (Materialy seminar). 2015;18:402-406 (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Кузнецов Андрей Альбертович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Изварин Михаил Юльевич, кандидат технических наук, доцент;
e-library SPIN 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail misha3568723@yandex.ru

Information about the authors:

Andrey A. Kuznetsov, Doctor of Technical Science, professor;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Mikhail Y Izvarin, Candidate of Technical Sciences, docent;
e-library SPIN 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail misha3568723@yandex.ru

Цитировать:

Кузнецов А.А., Изварин М.Ю. Использование энергии рекуперативного торможения в системе отопления пассажирских вагонов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 33–43. doi: 10.17816/transsyst20239233-43

To cite this article:

Kuznetsov AA, Izvarin MYu. Use of regenerative braking energy in the passenger coaches heating system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):33-43. doi: 10.17816/transsyst20239233-43