

Оценка применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов

А.А. Бакланов✉, А.П. Шилияков

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉aleksbakl@mail.ru

Резюме

Расширение возможностей использования рекуперативного торможения современного электроподвижного состава является актуальной проблемой в контексте увеличения интенсивности движения поездов. В статье представлены результаты исследования применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности и безопасности движения грузовых и пассажирских поездов. В работе использовались следующие методы: математический анализ, методы тяговых расчетов и энергетического баланса. Рассмотрены уравнения энергетического баланса движения поезда и его составляющих в режиме рекуперативного торможения, позволяющие выявить основные факторы, влияющие на возврат электроэнергии. Получены зависимости возврата электроэнергии при рекуперативном торможении, помогающие оценить воздействие отдельных факторов на возврат электроэнергии в процессе рекуперативного торможения электровоза. Авторами даны рекомендации по сокращению энергозатрат при вождении поездов с использованием рекуперативного торможения. Представлены результаты применения данного вида торможения для снижения скорости и повышения безопасности движения поездов. Показано, что рекуперативное торможение позволяет достаточно эффективно снижать скорость движения грузовых груженных и порожних, а также пассажирских вагонов. Однако наиболее целесообразно применять такое торможение на грузовых порожних и пассажирских поездах. Определены условия, которые способствуют увеличению возврата электроэнергии при рекуперативном торможении электровозов и позволяют использовать такое торможение для снижения скорости движения. Применение разработанных предложений повысит энергетическую эффективность электрической тяги и безопасность железнодорожного транспорта.

Ключевые слова

электровоз, рекуперативное торможение, грузовой поезд, пассажирский поезд, возврат электроэнергии, безопасность движения

Для цитирования

Бакланов А.А. Оценка применения рекуперативного торможения электровозов для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов / А.А. Бакланов, А.П. Шилияков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 41–51. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).41-51.

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2024 г.; принята к публикации: 05.09.2024 г.

Evaluation of the use of regenerative braking of electric locomotives to improve the energy efficiency of electric traction and train safety

A.A. Baklanov✉, A.P. Shilyakov

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉aleksbakl@mail.ru

Abstract

Expanding the possibilities of using regenerative braking of modern electric rolling stock is a pressing issue in the context of increasing train traffic intensity. The article presents the results of a study on the use of regenerative braking of electric locomotives to improve energy efficiency and traffic safety of freight and passenger trains. Methods used: mathematical analysis, methods of traction calculations and energy balance. The equations of the energy balance of the movement of a train and its components in the regenerative braking mode are considered, which make it possible to identify the main factors influencing the recovery of electricity. The dependences of the recovery of electricity during regenerative braking are obtained, which make it possible to evaluate the influence of individual factors on the recovery of electricity during regenerative braking of an electric locomotive. Recommendations are given for reducing energy consumption when driving trains using regenerative braking. The results of using regenerative braking of electric locomotives to reduce speed and improve train safety are presented. It has been shown that regenerative braking makes it possible to quite effectively reduce the speed of loaded and empty freight trains, as well as passenger trains. However, it is most advisable to use such braking to reduce the speed of empty freight and passenger trains. The con-

ditions under which it is possible to increase the recovery of electricity during regenerative braking of electric locomotives and use such braking to reduce the speed of movement have been determined. The application of the developed proposals will improve the energy efficiency of electric traction and the safety of train traffic.

Keywords

electric locomotive, regenerative braking, freight train, passenger train, electricity recovery, traffic safety

For citation

Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Otsenka primeneniya rekuperativnogo tormozheniya elektrovozov dlya povysheniya energeticheskoi effektivnosti elektricheskoi tyagi i bezopasnosti dvizheniya poyezdov [Evaluation of the use of regenerative braking of electric locomotives to improve the energy efficiency of electric traction and train safety]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 41–51. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).41-51.

Article info

Received: April 15, 2024; Revised: September 4, 2024; Accepted: September 5, 2024.

Введение

Объектом исследования является рекуперативное торможение (РТ) электроподвижного состава (ЭПС), которое получило широкое распространение в электрической тяге поездов на железнодорожном транспорте. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что при прочих равных условиях РТ электровозов является необходимым, а во многих случаях и достаточным условием получения минимального расхода электроэнергии на тягу поездов [1–16]. Поэтому обычно его используют для сокращения расхода энергии на тягу путем преобразования избыточной механической энергии в электрическую с помощью тяговых электродвигателей (ТЭД) и возврата ее в систему тягового электроснабжения для использования другими электровозами, работающими в режиме тяги. Однако иногда РТ также применяют и для снижения скорости движения поезда перед участками с ограничениями скорости и даже для остановок.

Для эффективного применения РТ требуются определенные условия. Это прежде всего наличие потребителей электроэнергии, выработанной рекуперировавшим электровозом, т.е. нахождение в зоне рекуперации других электровозов, движущихся с поездами в тяговом режиме, которые потребляют возвращенную в тяговую сеть электроэнергию, создавая тем самым нагрузку для рекуперировавшего электровоза [7, 8]. При наличии в зоне рекуперации электровозов, работающих в режиме тяги, напряжение в контактной сети, как правило, не превышает допустимого значения [1–4]. Другим обязательным условием безопасного и эффективного применения РТ является реализация тормозной силы рекуперировавшим электровозом без превышения

предела по сцеплению колес с рельсами, т.е. реализация безюзового торможения для предотвращения возникновения так называемых ползунов на поверхностях катания колес электровоза [13, 14]. Указанные условия необходимо учитывать при рассмотрении процесса рекуперативного торможения ЭПС.

Цель работы заключается в оценке энергетической эффективности РТ электровоза при движении поезда с установившейся и неустановившейся скоростью, определении степени влияния различных факторов на возврат электроэнергии, разработке рекомендаций по повышению энергетической эффективности РТ электровоза и безопасности движения поездов.

Расчетные формулы

В соответствии с энергетическим балансом движения поезда возврат электроэнергии электровоза A_3 в режиме РТ характеризуется уравнением:

$$A_3 = A_{эд} + A_{сн} = A_{д} \eta_{эд} + A_{сн} = (A_{к} + A_{п} + A_{сo} + A_{сr}) \cdot \eta_{эд} + A_{сн}, \quad (1)$$

где $A_{эд}$ – электроэнергия, выработанная ТЭД; $A_{сн}$ – электроэнергия, потребленная собственными нуждами электровоза; $A_{д}$ – механическая энергия, преобразуемая ТЭД в электрическую энергию; $\eta_{эд}$ – коэффициент полезного действия (КПД) энергетической цепи ТЭД; $A_{к}$, $A_{п}$ – изменения кинетической и потенциальной энергии поезда; $A_{сo}$ и $A_{сr}$ – затраты энергии на преодоление основного и дополнительного сопротивления движению от кривых.

Из уравнения (1) видно, что количество механической энергии, которое может быть преобразовано в электрическую в процессе торможения, определяется изменениями кине-

тической и потенциальной энергии поезда и затратами энергии на преодоление основного и дополнительного сопротивления движению от кривых, характеризуемых выражениями:

$$A_k = mk_u \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}; A_{\text{п}} = mgiL; A_{\text{со}} = mgw_oL;$$

$$A_{\text{сг}} = mgw_rL,$$

где $m = m_{\text{л}} + m_{\text{с}} = m_{\text{л}} + n_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}}$ – масса поезда; $m_{\text{л}}$, $m_{\text{с}}$ – масса локомотива и состава; $n_{\text{в}}$, $m_{\text{в}}$ – число вагонов и масса одного вагона; k_u – коэффициент инерции вращающихся частей поезда [17]; V_1, V_2 – начальная и конечная скорости на участке рекуперативного торможения; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; i, L – крутизна уклона и длина участка рекуперативного торможения; w_o и w_r – удельные основное и дополнительное сопротивление движению от кривых.

Затраты энергии на собственные нужды электровоза и поезда определяются их мощностью $P_{\text{с.н.}}$ и временем движения T в режиме РТ:

$$A_{\text{сн}} = P_{\text{сн}} \cdot T.$$

Удельный возврат электроэнергии в режиме РТ электровоза ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$) определяется выражением:

$$a_3 = \frac{A_3 \cdot 10^4}{m_c L}.$$

Относительным показателем эффективности РТ является коэффициент возврата электроэнергии, который оценивают для одной поездки или для всей совокупности поездок на данном участке в виде отношения полного возврата электроэнергии $A_{\text{зр}}$ в режиме РТ к полному потреблению электроэнергии $A_{\text{зт}}$ в режиме тяги по формуле:

$$k_p = \frac{A_{\text{зр}}}{A_{\text{зт}}}.$$

В режиме РТ обычно поддерживают заданную скорость движения на спуске, но иногда его используют для снижения скорости. В первом случае РТ на спуске реализуется чаще всего при постоянной скорости движения, во втором случае РТ начинается от высокой скорости и продолжается до некоторой минимальной скорости, ограниченной определенными условиями.

Рекуперативное торможение с установившейся скоростью движения на спусках

Рассмотрим особенности возврата электроэнергии при РТ электровоза с грузовым

грузеным и порожним поездами. Состав поезда сформирован из инновационных четырехосных грузовых вагонов, количество вагонов 71, масса груженого состава 7 100 т, порожнего – 1 775 т. Масса электровоза принята равной 200 т, КПД энергетической цепи ТЭД электровоза – 0,8, мощность собственных нужд электровоза – 120 кВт. Остальные исходные данные взяты из [17–19].

На рис. 1 а, б показаны рассчитанные по приведенным ранее формулам кривые удельного возврата электроэнергии в режиме РТ электровоза с грузовыми груженым поездом массой 7 100 т и порожним поездом массой 1 775 т в зависимости от установившейся скорости движения на спусках различной крутизны. Их анализ показывает, что при неизменной скорости движения поезда и увеличении крутизны уклона удельный возврат электроэнергии пропорционально возрастает.

На уклоне неизменной крутизны при уменьшении скорости движения удельный возврат электроэнергии в зоне высоких скоростей возрастает, достигает максимума, а в зоне низких скоростей снижается. Такие изменения связаны с влиянием затрат энергии на собственные нужды электровоза и преодоление основного сопротивления движению поезда. По сравнению с груженым поездом при прочих равных условиях возврат электроэнергии порожним поездом меньше и в большей степени зависит от скорости движения, собственных нужд поезда, климатических факторов.

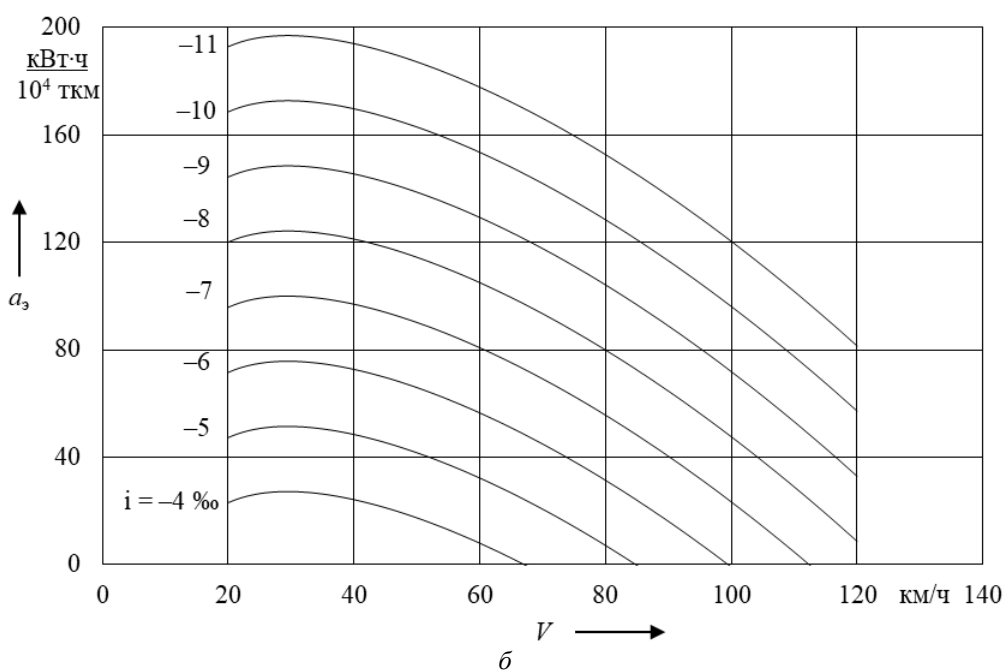
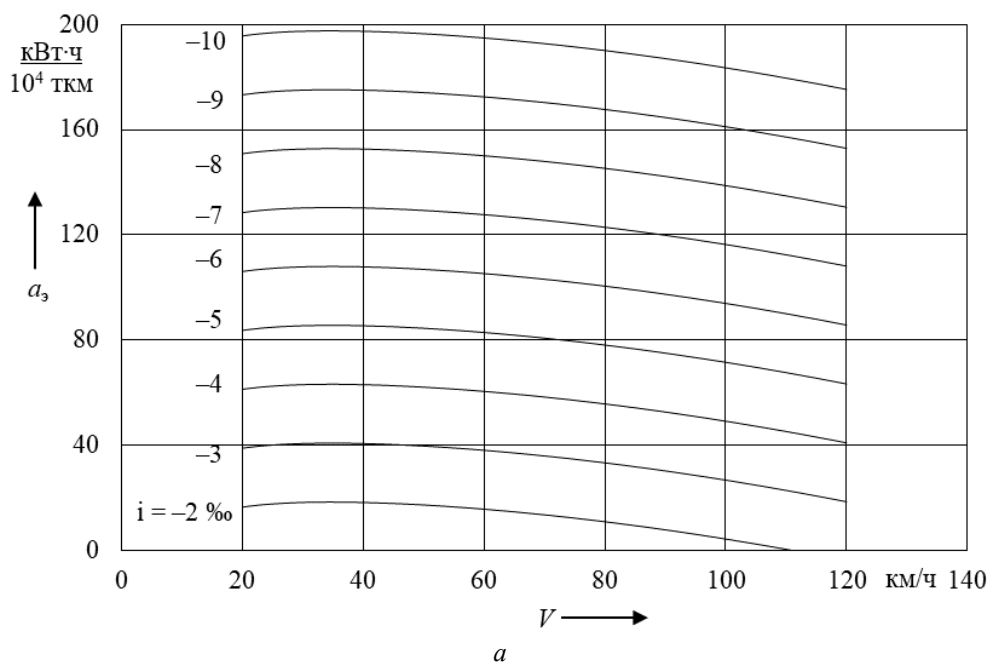
При изменении скорости движения на уклоне неизменной крутизны удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении у порожнего поезда изменяется в большей степени, чем у груженого, поскольку при увеличении скорости у порожнего поезда он значительно уменьшается. Это обусловлено влиянием энергозатрат на преодоление сопротивления движению поезда и собственными нуждами электровоза на результирующий возврат электроэнергии. Максимальный возврат электроэнергии грузового груженого поезда находится в диапазоне скорости движения 20–60 км/ч, порожнего поезда – в диапазоне 20–40 км/ч.

Рассмотрим особенности возврата электроэнергии при РТ электровоза с пассажирским поездом без электроотопления вагонов (летний период) и с электроотоплением вагонов (зимний период). Состав сформирован из четырехосных

пассажирских вагонов, количество вагонов 17, масса состава 1 020 т. Масса электровоза принята равной 132 т, КПД энергетической цепи ТЭД электровоза – 0,8, мощность собственных нужд электровоза – 100 кВт, мощность электроотопления вагона – 30 кВт, мощность подвагонного генератора – 10 кВт. Остальные исходные данные взяты из [17–19].

На рис. 1 в, г приведены кривые удельно-го возврата электроэнергии в режиме РТ элек-

тровоza с пассажирским поездом массой 1 020 т в зависимости от установившейся скорости движения на спусках различной крутизны без электроотопления вагонов $a_{эбо}$ (летний период) и с электроотоплением вагонов $a_{эсо}$ (зимний период). Их анализ показывает, что при неизменной скорости движения поезда и увеличении крутизны уклона удельный возврат электроэнергии пропорционально возрастает.



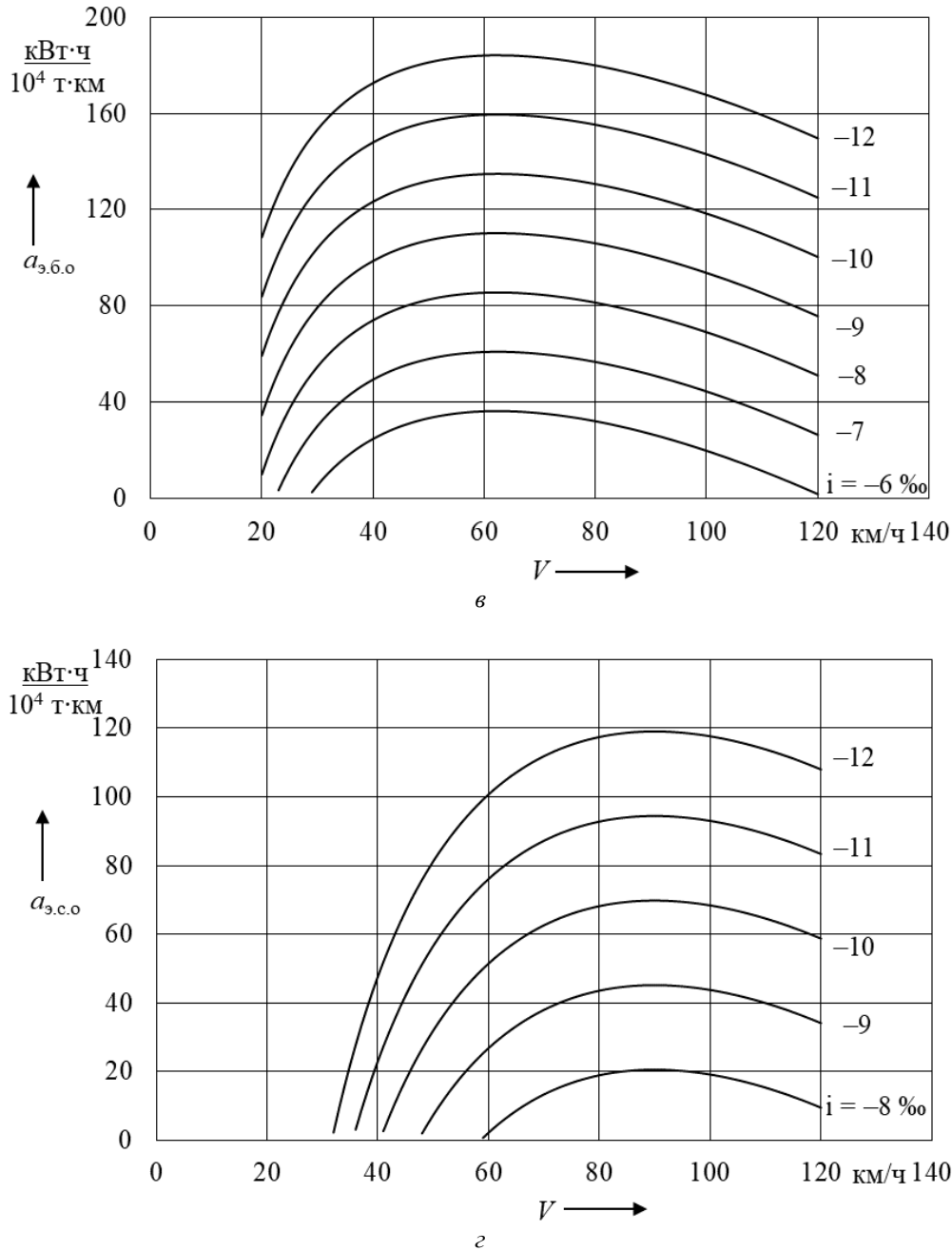


Рис. 1. Удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза: a – с грузовым груженым поездом массой 7 100 т; b – с грузовым порожним поездом массой 1 775 т; v – с пассажирским поездом массой 1 020 т в летний период без электроотопления вагонов; z – с пассажирским поездом массой 1 020 т в зимний период с электроотоплением вагонов

Fig. 1. Specific recovery of electricity during regenerative braking of an electric locomotive: a – with a loaded freight train weighing 7 100 tons; b – with an empty freight train weighing 1 775 tons; v – with a passenger train weighing 1 020 tons in summer without electric heating of wagons; z – with a passenger train weighing 1 020 tons in winter with electric heating of wagons

На уклоне неизменной крутизны при уменьшении скорости движения удельный возврат электроэнергии пассажирским поездом при РТ в зоне высоких скоростей возрастает, достигает максимума, а в зоне низких скоростей сни-

жается. В зимний период при низкой температуре воздуха возврат электроэнергии в систему тягового электроснабжения сокращается, так как большая часть выработанной тяговыми двигателями электроэнергии потребляется собственны-

ми нуждами поезда. Такие изменения связаны с влиянием затрат энергии на преодоление основного сопротивления движению и собственные нужды поезда, прежде всего электроотопление вагонов. Максимальный возврат электроэнергии в летний период находится в диапазоне скорости движения 50–70 км/ч, а в зимний период – в диапазоне 80–100 км/ч. По сравнению с грузовым поездом возврат электроэнергии пассажирским поездом при прочих равных условиях меньше и в большей степени зависит от скорости движения, собственных нужд поезда и климатических факторов.

Для получения высокой эффективности РТ необходимым и обязательным условием, как отмечено ранее, является наличие на межподстанционной зоне не только рекуперирующего электровоза, но и электровозов в режиме тяги, которые сразу же потребляют возвращенную в тяговую сеть электроэнергию [7–12]. По данным локомотивных депо и по результатам экспериментов, относительный возврат электроэнергии достигает 10–15 %, а в некоторых случаях 50 % и более [5, 6].

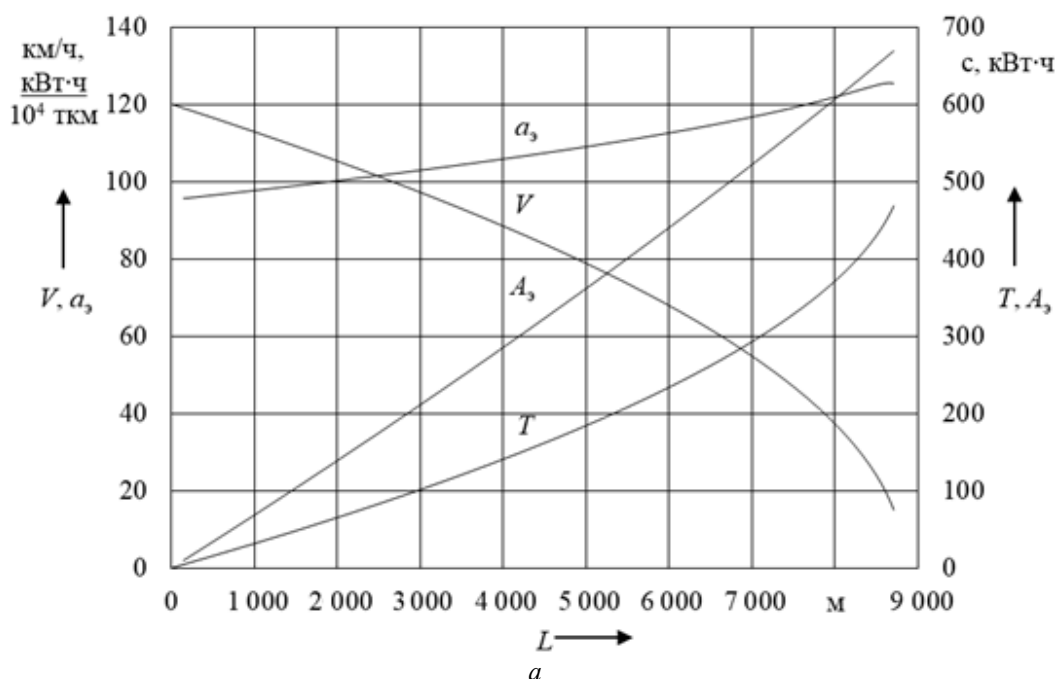
Зависимости на рис. 1, *a* имеют экстремальные значения при определенной скорости движения поезда, которую можно назвать энергооптимальной. Исследование на экстремум согласно [20, 21] кривых $a_3(V)$ показывает, что они приобретают экстремальные значения при следующих значениях скорости движения:

- грузовой поезд массой 7 100 т – 34,7 км/ч;
- грузовой поезд массой 1 775 т – 29,5 км/ч;
- пассажирский поезд без электроотопления вагонов – 56,9 км/ч;
- пассажирский поезд с электроотоплением вагонов – 87,2 км/ч [15, 16].

Рекуперативное торможение со снижением скорости движения на площадке

Наряду с экономией электроэнергии рекуперативное торможение электровозов в определенной степени позволяет повысить безопасность движения поездов. На рис. 2 приведены расчетные кривые движения грузовых поездов: груженого массой 7 100 т и порожнего массой 1 775 т, а также пассажирского поезда массой 1 020 т в режиме РТ на площадке со снижением скорости движения от 120 до 15 км/ч. В грузовых поездах предусмотрена реализация максимальной тормозной силы по сцеплению колес электровоза с рельсами, в пассажирском поезде тормозная сила электровоза принята равной 150 кН.

Анализ полученных кривых движения показывает, что в режиме РТ грузового электровоза при снижении скорости от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном пройденный путь L составляет с поездом массой 7 100 т 8 807 м и массой 1 775 т – 2 579 м; время движения T – соответственно 468,6 с (7,8 мин.) и 137,2 с (2,3 мин.); средняя скорость $V_{ср}$ соответственно 68,7 и 67,7 км/ч; ускорение



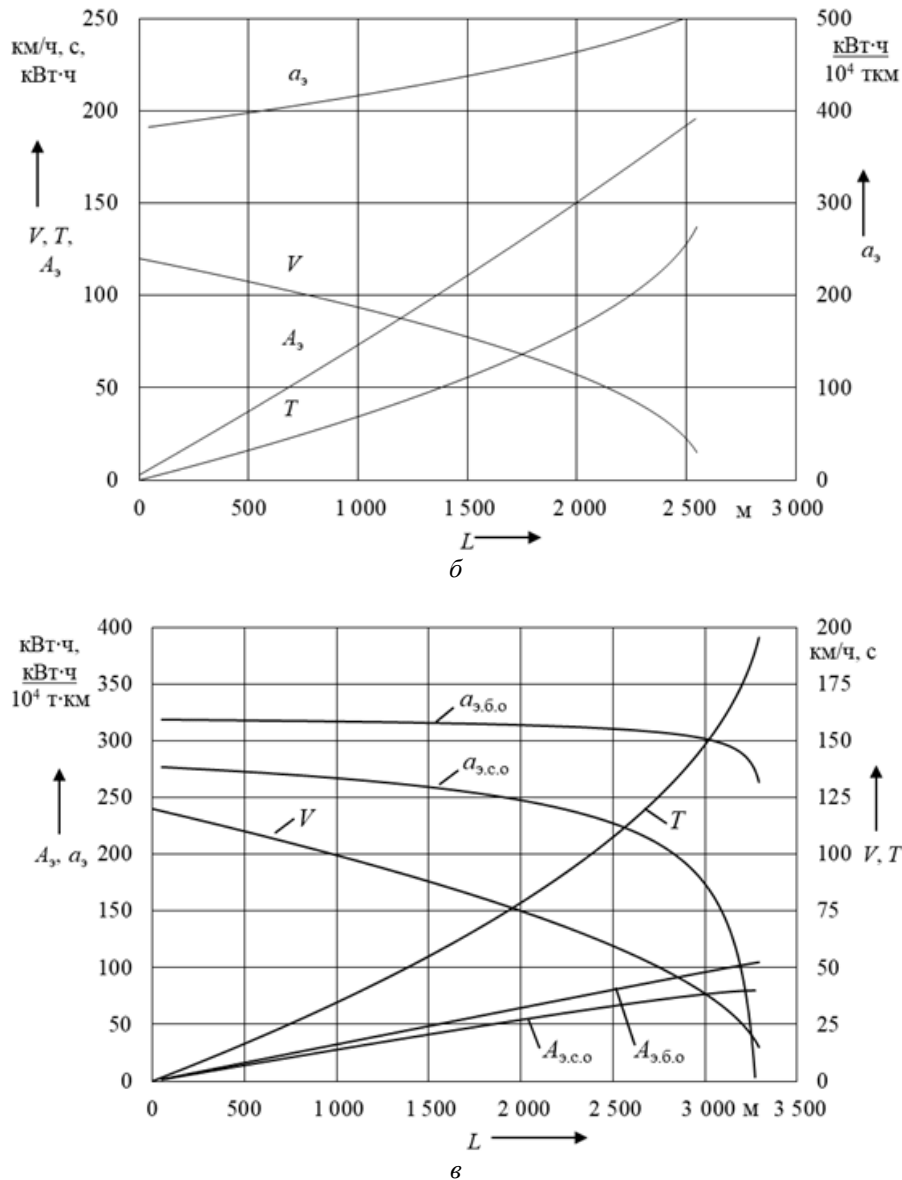


Рис. 2. Кривые движения в режиме рекуперативного торможения на площадке со снижением скорости: a – грузового груженого поезда массой 7 100 т; $б$ – грузового порожнего поезда массой 1 775 т; $в$ – пассажирского поезда массой 1 020 т

Fig. 2. Curves of movement in the mode of regenerative braking on the site with a decrease in speed: a – a loaded freight train weighing 7 100 tons; $б$ – an empty freight train weighing 1 775 tons; $в$ – a passenger train weighing 1 020 tons

(замедление) поезда и соответственно в диапазоне от $-0,061$ до $-0,065$ и от $-0,21$ до $-0,22 \text{ м/с}^2$. Полный возврат электроэнергии в тяговую сеть A_3 составляет электровозом с поездом массой 7 100 т 676,3 кВт·ч и массой 1 775 т – 198,0 кВт·ч; удельный возврат электроэнергии a_3 соответственно в диапазоне 95–125 и 382–501 кВт·ч/ $10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$; расход электроэнергии на собственные нужды электровоза $A_{с.н}$ соответственно 15,6 и 4,6 кВт·ч.

В целом можно отметить, что несмотря на снижение скорости движения, удельный возврат электроэнергии за период РТ возрастает, поскольку увеличивается тормозная сила и уменьшается сопротивление движению. При прочих равных условиях полный возврат электроэнергии режиме РТ тяжелого груженого поезда больше, чем порожнего поезда, хотя у последнего удельный возврат электроэнергии выше. РТ электровоза с поездом (особенно

большой массы) перед местами с ограничениями скорости движения целесообразно применять для снижения скорости движения в случае наличия достаточного запаса времени и расстояния до таких мест.

В режиме РТ пассажирского электровоза с поездом массой 1 020 т при снижении скорости от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном пройденный путь L составляет 3 292 м; время движения T – 195,5 с (3,3 мин.); средняя скорость V_{cp} – 60,6 км/ч; ускорение (замедление) поезда u находится в диапазоне от $-0,16$ до $-0,18$ м/с². Возврат энергии в тяговую сеть без электроотопления вагонов (в летний период) $A_{э.б.о}$ составляет 106,1 кВт · ч, а с электроотоплением вагонов (в зимний период) – 81,1 кВт · ч. Удельный возврат энергии без электроотопления вагонов (в летний период) $a_{э.б.о}$ находится в диапазоне 321–279 кВт · ч/10⁴ т · км, его среднее значение – 316,0 кВт · ч/10⁴ т · км; с электроотоплением вагонов (в зимний период) $a_{э.с.о} = 279–0$ кВт · ч/10⁴ т · км, его среднее значение – 241,5 кВт · ч/10⁴ т · км. За период снижения скорости от 120 до 15 км/ч расход электроэнергии на собственные нужды электровоза $A_{с.н}$ составляет 3,7 кВт · ч, на работу подвагонных генераторов $A_{п.г}$ – 10,4 кВт · ч, на электроотопление вагонов $A_о$ – 25,0 кВт · ч. Несмотря на снижение скорости движения, удельный возврат электроэнергии за период торможения

достаточно стабильный, и только в конце торможения существенно снижается, особенно с электроотоплением вагонов, когда практически вся выработанная ТЭД электроэнергия расходуется на электроотопление вагонов и собственные нужды электровоза.

Основные результаты применения РТ для снижения скорости движения поездов приведены в табл. 1 и 2.

Анализ полученных результатов показывает, что за счет полезного использования избыточной механической энергии поезда с помощью РТ в тяговую сеть возвращается значительное количество электроэнергии, т.е. достигается существенная экономия электроэнергии на тягу поездов. При этом удельный возврат электроэнергии грузового порожнего и пассажирского поездов, имеющих сравнительно небольшую массу, находится практически на таком же уровне, как у грузового груженого поезда большой массы, т.е. энергетическая эффективность РТ поездов меньшей массы тоже достаточно высокая.

Одним из основных показателей, характеризующих безопасность движения, является длина тормозного пути. Согласно [17–19] при полном служебном торможении на площадке от скорости 120 км/ч до 0 длины тормозных путей составляют:

– грузовой груженный поезд с тормозным коэффициентом 0,33 – 2 420 м;

Таблица 1. Показатели применения рекуперативного торможения для снижения скорости движения грузовых поездов

Table 1. Regenerative braking performance indicators to reduce the speed of freight trains

Параметр Parameter	Площадка Site		Спуски Descents $i = -2 \dots -11 \%$	
Масса поезда m , т Train mass; m , t	7 100	1 775	7 100	1 775
Диапазон скорости V , км/ч Speed range V , km/h	120–15	120–15	20–120	20–120
Пройденный путь L , км Distance traveled L , km	8,807	2,579	–	–
Время движения T , мин. Time in motion T , min	7,8	2,3	–	–
Средняя скорость V_i , км/ч Average speed V_i , km/h	68,7	67,7	–	–
Среднее замедление u_i , м/с ² Average slowdown u_i , m/sec ²	$-0,061 \dots -$ 0,065	$-0,21 \dots -$ 0,22	0	0
Возврат электроэнергии $A_э$, кВт·ч Energy recovery $A_э$, kVt/h	676,3	198,0	–	–
Удельный возврат электроэнергии $a_э$, кВт·ч/10 ⁴ т · км Specific energy recovery $a_э$, kVt h/10 ⁴ tkm	108,2	432,5	0–200	0–200

Таблица 2. Показатели применения рекуперативного торможения для снижения скорости движения пассажирского поезда
Table 2. Regenerative braking performance indicators to reduce the speed of a passenger train

Параметр Parameter	Площадка Site		Спуски Descents $i = -6 \dots -12 \%$	
	без электрического обогрева вагонов without electric heating of wagons	с электрическим обогревом вагонов with electric heating of wagons	без электрического обогрева вагонов without electric heating of wagons	с электрическим обогревом вагонов with electric heating of wagons
Диапазон скорости V , км/ч Speed range V , km/h	120–15	120–15	20–120	20–120
Пройденный путь L , км Distance traveled L , km	3,292	3,292	–	–
Время движения T , мин. Time in motion T , min	3,3	3,3	–	–
Средняя скорость V_t , км/ч Average speed V_t , km/h	60,6	60,6	–	–
Среднее замедление u_t , м/с ² Average slowdown u_t , m/sec ²	–0,16 ... –0,18	–0,16 ... –0,18	0	0
Возврат электроэнергии A_3 , кВт·ч Energy recovery A_3 , kVt/h	104,8	79,9	–	–
Удельный возврат электроэнергии a_3 , кВт·ч/10 ⁴ т·км Specific energy recovery a_3 , kVt h/10 ⁴ t·km	312,1	238,0	0–190	0–130

– грузовой порожний поезд с тормозным коэффициентом 0,6 – 1 430 м;

– пассажирский поезд с тормозным коэффициентом 0,6 – 1 260 м.

Данные табл. 1 и 2 показывают, что длины тормозных путей при РТ значительно больше, чем при механическом торможении. Несмотря на это, РТ целесообразно применять для снижения скорости движения поезда перед участками с ограничением скорости, перед остановками, особенно при наличии запаса времени хода, а также при отказе автотормозов.

Заключение

По энергетическому балансу движения поезда можно без выполнения традиционных тяговых расчетов определить основные энергетические и кинематические показатели РТ. Их анализ показывает, что для повышения энергетической эффективности электрической тяги и безопасности движения поездов РТ целесообразно использовать не только с грузовыми тяжелыми поездами, но и с грузовыми порожними и пассажирскими поездами.

Применение РТ сокращает время хода поездов за счет большей скорости движения на спусках, повышает энергетическую эффективность электрической тяги и снижает расход электроэнергии, особенно на участках с перевальным профилем пути благодаря возврату энергии в тяговую сеть, при этом удельный возврат энергии пассажирского и грузового порожнего поездов находится практически на том же уровне, как у грузового груженого поезда.

РТ позволяет повысить безопасность движения поездов, наиболее эффективно его применять при наличии запаса времени хода для снижения скорости движения поезда перед участками с ограничением скорости, перед остановками, а также при отказе автотормозов.

Основными условиями наиболее эффективного применения РТ являются наличие потребителей электроэнергии в зоне рекуперирующего электровоза и обеспечение безбюзового торможения.

Полученные результаты показывают высокую эффективность РТ и возможность его более широкого применения на железных дорогах.

Список литературы

1. Сидорова Н.Н., Третинников О.В., Феоктистов В.П. Повышение эффективности рекуперативного торможения в электрической тяге // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 19–22.
2. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Повышение эффективности электроподвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2010. № 9. С. 33–36.
3. Мельниченко О.В., Газизов Ю.В. Повышение энергетических показателей электровозов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 3. С. 50–51.
4. Сопов В.И., Штанг А.А., Спиридонов Е.А. Количественная оценка объемов энергии тяги и торможения на основе обработки экспериментальных данных // Транспортные системы Сибири : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Красноярск, 2004. С. 143.
5. Бакланов А.А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов // Транспорт: наука, техника, управление. 2005. № 6. С. 32–35.
6. Бакланов А.А., Швецов С.В., Шилияков А.П. Пути повышения энергоэффективности применения систем рекуперативного торможения на Красноярской железной дороге // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Омск, 2012. С. 300–308.
7. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 60–70.
8. Никифоров М.М., Вильгельм А.С., Гутников В.И. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2017. № 1 (29). С. 74–83.
9. Игин В.Н. Эффективность рекуперативного торможения // Локомотив. 2016. № 7 (715). С. 2–6.
10. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles / V.N. Le, H.Ph. Dam, T.H. Nguyen et al. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66. № 2. С. 105–123.
11. Обзор перспектив повышения энергетической эффективности и надёжности рекуперативного торможения на электроподвижном составе / И.А. Баринов, Д.А. Яговкин, В.С. Иванов и др. // Электропривод на транспорте и в промышленности : тр II Всерос науч.-практ. конф. Хабаровск, 2018. С. 150–156.
12. Влияние рекуперативного торможения на энергоэффективность и качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов и др. // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 69–79.
13. Тиунов А.Ф., Тупицын О.И. Рекуперативное торможение на магистральных электровозах постоянного тока. М. : Транспорт, 1979. 102 с.
14. Капустин Л.Д., Копанев А.С., Лозановский А.Л. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80р. М. : Транспорт, 1979. 175 с.
15. Бакланов А.А., Шилияков А.П. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов постоянного тока // Известия Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 23–33.
16. Бакланов А.А., Шилияков А.П. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов // Известия Транссиба. 2021. № 4 (48). С. 11–22.
17. Астахов П.Н., Гребенюк П.Т., Скворцова А.И. Справочник по тяговым расчетам. М. : Транспорт, 1973. 256 с.
18. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. 287 с.
19. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р (ред. 05.12.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
20. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1986. 544 с.
21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1973. 832 с.

References

1. Sidorova N.N., Tretinnikov O.V., Feoktistov V.P. Povyshenie effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya v elektricheskoi tyage [Increasing the efficiency of regenerative braking in electric traction]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2015, no. 1, pp. 19–22.
2. Maznev A.S., Evstaf'ev A.M. Povyshenie effektivnosti elektropodvizhnogo sostava [Improving the efficiency of electric rolling stock]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2010, no. 9, pp. 33–36.
3. Mel'nichenko O.V., Gazizov Yu.V. Povyshenie energeticheskikh pokazatelei elektrovozov [Increasing the energy performance of electric locomotives]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2010, no. 3, pp. 50–51.
4. Sopov V.I., Shtang A.A., Spiridonov E.A. Kolichestvennaya otsenka ob'yemov energii tyagii tormozheniya na osnove obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Quantitative assessment of the energy of thrust and braking based on the processing of experimental data]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Transportnye sistemy Sibiri»* [Proceedings of the II International Scientific-Technical Conference «Transport Systems of Siberia»]. Krasnoyarsk, 2004, pp. 143.
5. Baklanov A.A. Energeticheskii balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poezdov [The energy balance of the movement to solve problems of reducing power consumption for train traction]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management], 2005, no. 6, pp. 32–35.
6. Baklanov A.A., Shvetsov S.V., Shilyakov A.P. Puti povysheniya energoeffektivnosti primeneniya sistem rekuperativnogo tormozheniya na Krasnoyarskoi zheleznoi doroge [Ways to improve energy efficiency the use of regenerative braking systems on the Krasnoyarsk Railway]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov»* (Proceedings of the All-Russian Scien-

tific and Technical Conference with International Participation «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»). Omsk, 2012, pp. 300–308.

7. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vil'helm A.S. Metodologiya otsenki energeticheskoi effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispol'zovaniya energii rekuperatsii [Methodology for assessing the energy efficiency of the use of regenerative braking and the use of energy recovery]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2016, no. 1 (25), pp. 60–70.

8. Nikiforov M.M., Vil'gel'm, A.S., Gutnikov V.I. Vliyanie parametrov i rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii [Influence of parameters and operating modes of the traction power supply system on the efficiency of using recuperation energy]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2017, no. 1 (29), pp. 74–83.

9. Igin V.N. Effektivnost' rekuperativnogo tormozheniya [Efficiency of regenerative braking]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2016, no. 7 (715), pp. 2–6.

10. Le V.N., Dam H.Ph., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kussyak V.A. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 105–123.

11. Barinov I.A., Yagovkin D.A., Ivanov V.S., Ustinov R.I., Shramko S.G., Lin'kov A.O., Mel'nichenko O.V., Vlasevskii S.V. Obzor perspektiv povysheniya energeticheskoi effektivnosti i nadezhnosti rekuperativnogo tormozheniya na elektropodvizhnom sostave [Review of prospects for increasing energy efficiency and reliability of regenerative braking on electric rolling stock]. *Trudy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti»* [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference «Electric drive in transport and industry»]. Khabarovsk, 2018, pp. 150–156.

12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na energoeffektivnost' i kachestvo elektroenergii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya [The influence of regenerative braking on energy efficiency and quality of electricity in traction power supply systems]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 2 (58), pp. 69–79.

13. Tiunov A.F., Tupitsyn O.I. Rekuperativnoe tormozhenie na magistral'nykh elektrovozakh postoyannogo toka [Regenerative braking on mainline DC electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1979. 102 p.

14. Kapustin L.D., Kopanov A.S., Lozanovskii A.L. Osobennosti ustroystva i ekspluatatsii elektrovoza VL80r [Features of the design and operation of the VL80r electric locomotive]. Moscow: Transport Publ., 1979. 175 p.

15. Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti passazhirskikh elektrovozov postoyannogo toka [Improving energy efficiency of passenger DC electric locomotive]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2019, no. 2 (38), pp. 23–33.

16. Baklanov A.A., Shilyakov A.P. Energeticheskaya effektivnost' rekuperativnogo tormozheniya gruzovykh elektrovozov [Energy efficiency of regenerative braking of freight electric locomotives]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no. 4 (48), pp. 11–22.

17. Astakhov P.N., Grebenyuk P.T., Skvortsova A.I. Spravochnik po tyagovym raschetam [Handbook of traction calculations]. Moscow: Transport Publ., 1973. 256 p.

18. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty [Traction rules for train operation]. Moscow: Transport Publ., 1985. 287 p.

19. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 12.05.2016 № 867r «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 05.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 2016 no. 867r «On approval of the rules of traction calculations for train operation» (ed. December 5, 2023)].

20. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of Mathematics for engineers and students of higher technical education organizations]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 544 p.

21. Korn G.A., Korn T.M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 832 p.

Информация об авторах

Бакланов Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: aleksbakl@mail.ru.

Шильяков Андрей Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: ShilyakovAP@omgups.ru.

Information about the authors

Alexandr A. Baklanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: aleksbakl@mail.ru.

Andrei P. Shilyakov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: ShilyakovAP@omgups.ru.