

В.С. Томилов, О.В. Мельниченко

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ В СИЛОВЫХ ПЛЕЧАХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Аннотация. Одной из задач ОАО «РЖД» «Стратегии научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030» является снижение удельного расхода электрической энергии электроподвижным составом и повышение его энергетической эффективности. Работающие сегодня на железных дорогах России отечественные электровозы переменного тока имеют неудовлетворительные энергетические показатели как в режиме тяги, так и в режиме рекуперации электрической энергии. В режиме рекуперации наблюдается значительное потребление реактивной электроэнергии электровозом из контактной сети, и, как следствие, крайне низкий коэффициент мощности, не превышающий значения 0,65 на высшей зоне регулирования напряжения. Наличие блоков балластных резисторов в силовой цепи, которое напрямую связано с принятым законом управления выпрямительно-инверторными преобразователями, не только ограничивает область тормозных характеристик электровоза, но и значительно снижает величину отдаваемой электроэнергии в контактную сеть. В данной статье авторами рассмотрен современный подход к решению вопроса энергетической эффективности электровоза в режиме рекуперации, а именно: применение выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов и разработка способа реализации рекуперативного торможения без блоков балластных резисторов с обеспечением высокой надежности режима.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзистор, рекуперативное торможение, статическая устойчивость, блок балластных резисторов, внешняя характеристика.

V.S. Tomilov, O.V. Melnichenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

PROVIDING STATIC STABILITY OF THE REGENERATIVE BRAKING MODE BY USING FULLY CONTROLLED IGBT-TRANSISTORS IN THE POWER ARM OF THE RECTIFIER-INVERTER CONVERTER

Abstract. One of the tasks of JSC Russian Railways in the Strategy for Scientific and Technological Development of Russian Railways Holding for the Period up to 2025 and in the Long Term until 2030 is to reduce the specific consumption of electric energy by electric rolling stock and increase its energy efficiency. Domestic electric locomotives of alternating current operating today on the railways of Russia have unsatisfactory energy indicators both in traction mode and in regenerative braking mode. In the recuperation mode, there is a significant consumption of reactive electricity by an electric locomotive from the contact network, and, as a result, an extremely low power factor, not exceeding 0.65 at the highest voltage regulation zone. The presence of blocks of ballast resistors in the power circuit, which is directly related to the adopted law of control of rectifier-inverter converters, not only limits the range of braking characteristics of the electric locomotive, but also significantly reduces the amount of electricity supplied to the overhead. In this article, the authors considered a modern approach to solving the issue of the energy efficiency of an electric locomotive in the recuperation mode, namely: the use of a rectifier-inverter converter based on IGBT transistors and the development of a method for implementing regenerative braking without blocks of ballast resistors with ensuring the electrical stability of this mode.

Keywords: AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT transistor, regenerative braking, power factor, ballast resistor block, external characteristic.

Введение

Для реализации режима рекуперативного торможения на электровозе переменного тока необходим перевод тяговых электродвигателей в генераторный режим при обеспечении их независимого возбуждения. При этом изменяется направление протекания тока якоря так, что генерируемый ток соответствует направлению проводимости тиристорных инверторов. Отпирание тиристорных инверторов осуществляется в конце полупериода напряжения тяговой сети с опережением окончания полупериода на угол β с целью обеспечения их проводящего состояния в отрицательный полупериод напряжения сети. Ток и напряжение контактной сети в режиме рекуперативного торможения электровоза находятся в противофазе, ток протекает против направления напряжения трансформатора, тем самым, тяговый трансформатор своей первичной обмоткой передает ток, вырабатываемый генераторами в контактную сеть [1]. В якорную цепь генераторов электровоза включено добавочное активное сопротивление,

которое предназначено для обеспечения электрической устойчивости работы системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока [2].

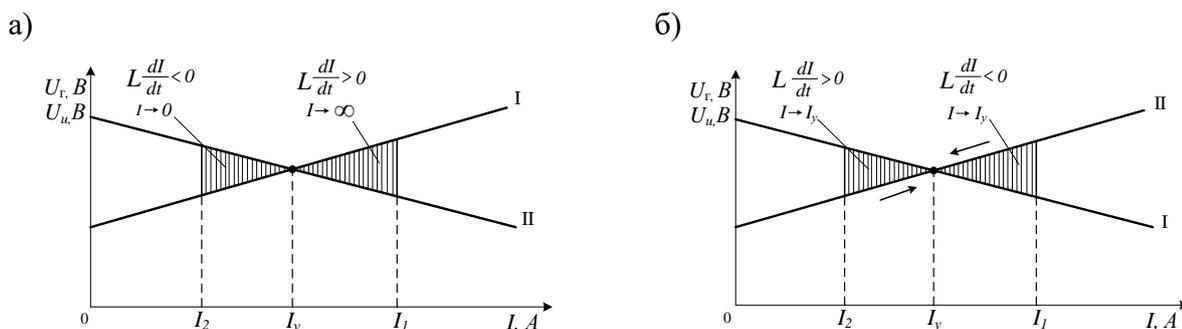
Исследование условий электрической устойчивости системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока

Статическая устойчивость определяется пересечением характеристик цепи двигателя и нагрузки. Взаимный наклон характеристик в этих точках должен удовлетворять условию статической устойчивости системы электрического рекуперативного торможения [1]. Предположим, что статическая внешняя характеристика генератора $U_d = f(I)$ обозначена кривой I на рисунке 1. А внешняя характеристика нагрузки (инвертора) $U_u = f(I)$ обозначена кривой II.

Тогда в точке пересечения этих характеристик наступит установившийся режим работы данной системы. Причем любое отклонение значения тока от его установившегося режима I_y в сторону увеличения, например, до значения I_1 , либо в сторону уменьшения до значения I_2 между ординатами характеристик I и II возникнет разность $U_d - U_u$, которую компенсирует лишь э.д.с. (электродвижущая сила) самоиндукции в переходном режиме, следовательно

$$U_d - U_u = L \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

где U_d, U_u – напряжение на генераторе и инверторе соответственно, В;



а – статически неустойчивая система; б – статически устойчивая система

Рис. 1. Внешние характеристики системы «генератор-инвертор»

В рассматриваемом случае при изменении величины установившегося тока в сторону его увеличения, напряжение генератора выше напряжения нагрузки, в таком случае величина $U_d - U_u$, и такое изменение тока сопровождается его дальнейшим ростом. Также если рассмотреть изменение величины установившегося тока в сторону его уменьшения, напряжение нагрузки выше напряжения генератора, величина э.д.с. самоиндукции $L \frac{dI}{dt}$, в таком случае изменение тока сопровождается его дальнейшим уменьшением. Таким образом, исходя из данных суждений можно сделать вывод о том, что система, отображенная на рисунке 1 (а) является статически неустойчивой.

Пользуясь аналогичными суждениями, система, отраженная на рисунке 1 (б) является статически устойчивой. При отклонении установившегося тока в сторону увеличения либо уменьшения, величина э.д.с. самоиндукции будет компенсировать появившуюся разность между напряжением генератора и инвертора. Таким образом, условие статической устойчивости режима рекуперативного торможения можно определить неравенством [1, 3]

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_u}{dI_d}, \quad (2)$$

где U_d, U_u – напряжение на генераторе и инверторе соответственно, В;

I_d – ток генератора, А.

Внешней характеристикой многозонного тиристорного инвертора называется зависимость приложенного к генератору напряжения в зависимости от выпрямленного тока, протекающего в цепи [4].

На значение величины напряжения и величины наклона внешней характеристики влияют: размеры активного и реактивного сопротивлений в цепи, а также электромагнитные процессы со стороны инвертора.

На рисунке 2 приведено семейство внешних характеристик тиристорного инвертора для законов управления с постоянным углом опережения $\beta = const$ и постоянным углом запаса $\delta = const$ [5].

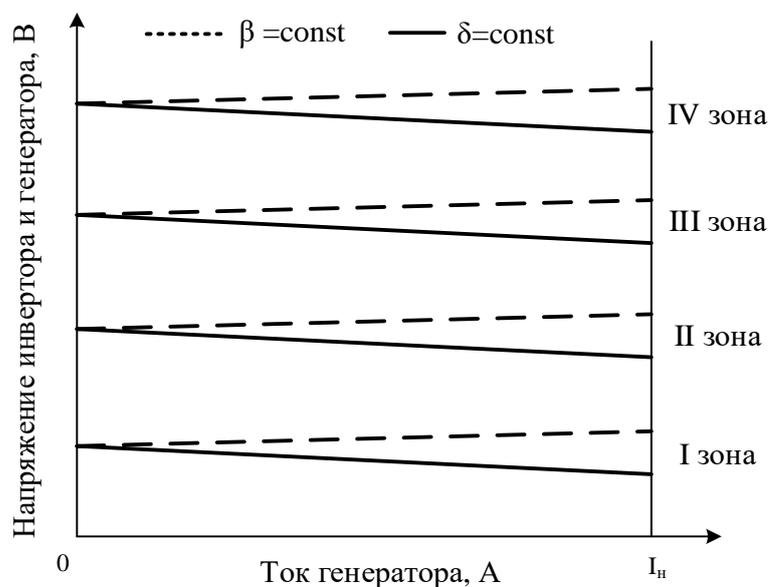


Рис.2. Семейство внешних характеристик тиристорного инвертора по законам управления $\beta = const$ и $\delta = const$ для различных зон регулирования напряжения

Наклон характеристик по мере увеличения протекающего в цепи тока зависит от закона управления инвертора. Принимая угол опережения открытия тиристорov ВИП, режим рекуперативного торможения имеет статическую устойчивость без добавления активного сопротивления в якорную цепь [5]. Внешняя характеристика генератора без использования дополнительного активного сопротивления практически прямолинейна и не имеет наклона, т.к. падение напряжения в нем с ростом тока невелико из-за небольшого внутреннего сопротивления. На рисунке 3 показана диаграмма изменения напряжения инвертора, при его работе в режимах холостого хода и номинальном, при управлении им по закону с постоянным углом опережения открытия тиристорov (а) и обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП (б).

На рисунке 3 приняты следующие условные обозначения: u_u, u_d – напряжение инвертора и генератора соответственно, В; $I_{ген}$ – ток генератора, А; 1 – режим холостого хода; 2 – режим номинальной работы; а – внешняя характеристика инвертора; б – внешняя характеристика генератора без ББР в якорной цепи.

Внешняя характеристика инвертора в свою очередь для рассматриваемого закона управления имеет положительный наклон, т.е. с увеличением тока увеличивается и величина среднего выпрямленного напряжения.

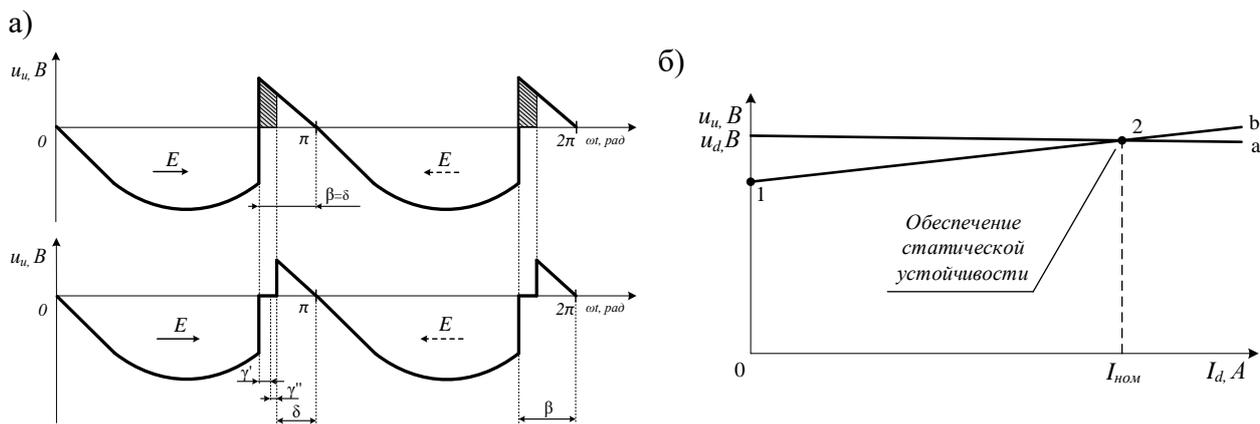


Рис.3. Диаграмма напряжения инвертора u_u для закона управления: а – режим холостого хода, $I_d = 0$; б – номинальный режим, $I_d = I_{ном}$ (а) и обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП (б)

Однако, несмотря на то, что по закону управления с постоянным углом опережения не требуется наличие дополнительного активного сопротивления в якорной цепи генераторов, при такой организации управления ВИП коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения находится в пределах 0.48, что обусловлено значительным потреблением реактивной энергии из контактной сети [5]. Выбирая угол постоянным при малых нагрузках, когда величина угла коммутации мала, наблюдается избыточное значение угла запаса δ , согласно уравнению

(3)

где – минимально допустимая величина угла запаса инвертора;

γ – величина угла коммутации инвертора.

С целью предотвращения этого недостатка на современных отечественных электровозах переменного тока регулирование угла опережения открытия тиристорov осуществляется с поддержанием минимально-допустимого угла запаса по закону . При этом реализуется автоматическое регулирование величины данного угла с целью поддержания постоянного минимального его значения, допустимого по условиям надежной работы плеч ВИП [6]. Реализация данного закона усложнена тем, что на величину угла коммутации γ , от которого зависит и угол запаса инвертора δ , влияют факторы, не связанные с параметрами самого электровоза. Входную величину системы автоматического регулирования принимают непосредственно зависящей от угла коммутации γ .

Такая организация управления инвертором позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения до значения 0.65 на высшей зоне регулирования напряжения ВИП.

На рисунке 4 показана диаграмма выпрямленного напряжения инвертора в точке холостого хода ($I_d = 0$) и номинального режима работы ($I_d = I_{ном}$) для закона управления (а) и условие выполнения статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП (б). На рисунке 4 приняты следующие условные обозначения: u_u , u_d – напряжение инвертора и генератора соответственно, В; $I_{ген}$ – ток генератора, А; 1 – режим холостого хода; 2 – режим номинальной работы; а – внешняя характеристика генератора без ББР в якорной цепи; б – внешняя характеристика инвертора; с – внешняя характеристика генератора с ББР в якорной цепи.

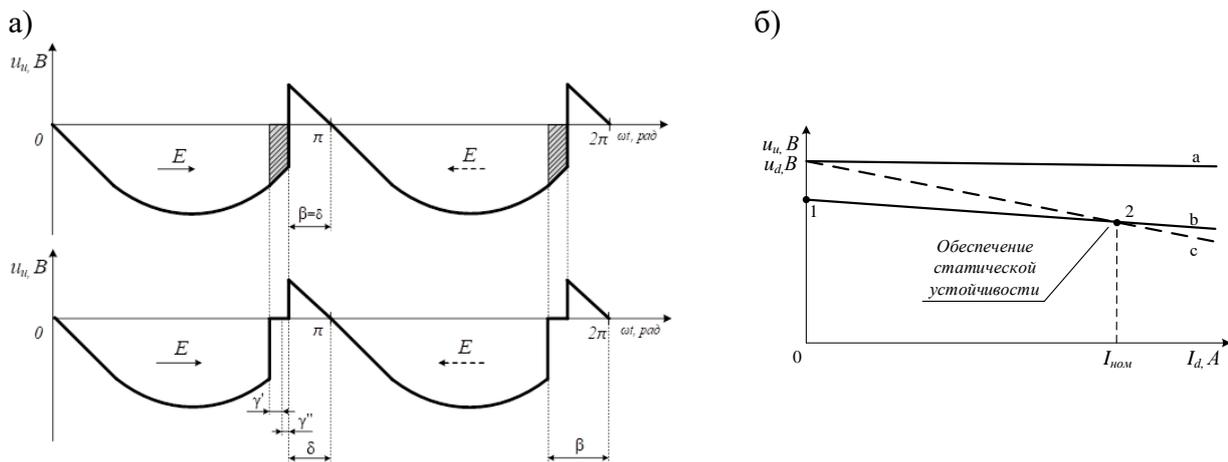


Рис. 4. Диаграмма напряжения инвертора u_u для закона управления : а – режим холостого хода, $I_d = 0$; б – номинальный режим, $I_d = I_{ном}$ (а) и условие выполнения статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП (б)

Внешняя характеристика инвертора в данном случае имеет отрицательный наклон, т.к. по мере увеличения тока растет значение угла коммутации γ , что при неизменном значении угла запаса δ приводит к уменьшению величины среднего выпрямленного напряжения. Несмотря на повышение коэффициента мощности по сравнению с $\beta = const$, данный закон управления влечет за собой ряд серьезных недостатков, основным из которых является вынужденная мера применения блоков балластных резисторов в якорной цепи генераторов, необходимого для придания внешней характеристики генератора более крутого наклона с целью обеспечения электрической устойчивости ресурсосберегающего рекуперативного торможения.

Внешнюю характеристику инвертора можно описать следующими уравнениями:

Величина средневыхрямленного напряжения инвертора в точке холостого хода

$$U_{u0i} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times U_{mi} = 0,9 \times U_{mi}, \quad (4)$$

где U_{mi} – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на i зоне регулирования, В.

Величина средневыхрямленного напряжения инвертора в номинальном режиме работы с учетом падения напряжения ΔU

$$U_{uni} = U_{u0i} \pm \Delta U = U_{u0i} \pm I_{dn} \times R_{эп} - \Delta U_g, \quad (5)$$

где I_{dn} – номинальный ток генератора, А;

$R_{эп}$ – эквивалентное сопротивление, определяющее наклон характеристики инвертора, Ом;

ΔU_g – падение напряжения в плечах ВИП, В.

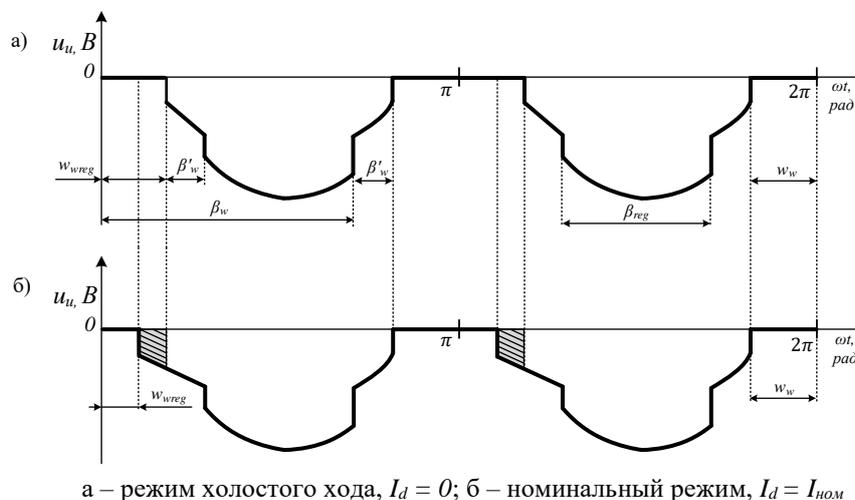
Стоит отметить, что в данном выражении знак плюс относится к режиму $\beta = const$, а знак минус – к режиму $\delta = const$ [1].

Предлагаемый способ реализации рекуперативного торможения без блоков балластных резисторов

Предлагаемый способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока заключается в том, что при использовании IGBT-транзисторов в плечах преобразователя, имеется возможность влиять на положение и наклон внешней характеристики инвертора на всех четырех зонах регулирования напряжения. Работа данного преобразователя подробно рассмотрена в работах [7, 8].

Как было рассмотрено ранее, для обеспечения устойчивой работы рекуперативного торможения без ББР необходимо чтобы внешняя характеристика инвертора имела положительный наклон, т.е. по мере увеличения тока в цепи необходимо чтобы увеличивалось

и напряжение инвертора [7, 8]. Достигнуть такого можно с помощью диодно-транзисторного разрядного плеча ВИП (VD9-VT9), а именно регулирования его рабочей зоны по переднему фронту напряжения. На рисунке 5 показана диаграмма выпрямленного напряжения инвертора на базе IGBT-транзисторов и его регулирование с помощью диодно-транзисторного разрядного плеча.



а – режим холостого хода, $I_d = 0$; б – номинальный режим, $I_d = I_{ном}$
Рис.5. Регулирование рабочей зоны диодно-транзисторного разрядного плеча

Заключение

1. Применение блоков балластных резисторов в силовой цепи является вынужденной мерой для обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения и его наличие зависит от применяемого способа управления ВИП в режиме рекуперации электрической энергии.

2. Разработанный алгоритм управления транзисторным ВИП в режиме рекуперативного торможения позволяет повысить величину рекуперированной электроэнергии в контактную сеть за счет исключения ББР из силовой цепи, что отвечает требованиям одной из приоритетных целевых задач холдинга ОАО «РЖД» о повышении энергетической эффективности за счет увеличения удельной рекуперации электрической энергии сеть.

3. Исключение ББР расширяет область тормозных характеристик электровоза и увеличивает величину рекуперированной электроэнергии.

4. Годовая экономия денежных средств с учетом снятого оборудования (ББР) с одного электровоза серии 2ЭС5К составит 880,96 тыс. руб.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по государственной работе «Разработка математических моделей электрической части электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения и энергосберегающих алгоритмов управления его преобразователями с применением диодно-транзисторного разрядного плеча» №121050600025-2 от 06.05.2021.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.
2. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации [Текст] / Новочеркасск: 2007. – т.1 – 635 с., т.2 – 640 с.
3. Плакс. А.В. Системы управления электрическим подвижным составом. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
4. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог [Текст] / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.

5. Лисунов В.Н. Применение рекуперативного торможения на участках переменного тока [Текст] / В.Н. Лисунов, В.М. Бабич, Б.С. Барковский, Л.В. Бычков // ЭТТ. – 1970. – №7 – С. 10–11.

6. Власьевский, С.В. Процессы коммутации тока вентилях в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока [Текст]: Монография / С.В. Власьевский // Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 112 с.

7. Томилов В. С. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, С.А. Богинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65 № 1. – С. 172–182. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).172-182.

8. Томилов В.С. Моделирование работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В.С. Томилов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения №2. 2021. С. 106-114.

REFERENCES

1. Trakhtman L.M. Electric braking of electric rolling stock [Text] / L.M. Trakhtman. - M.: Transport, 1965. - 204 p.

2. Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual [Text] / Novocherkassk: 2007. - vol. 1 - 635 p., Vol. 2 - 640 p.

3. Crybaby. A.V. Electric rolling stock control systems. A textbook for higher educational institutions of the railway. transport. - M.: Route, 2005. - 360 p.

4. Tikhmenev B.N. Rolling stock of electrified railways [Text] / B.N. Tikhmenev, L.M. Trakhtman. - M.: Transport, 1980. - 471 p.

5. Lisunov V.N. The use of regenerative braking in the areas of alternating current [Text] / V.N. Lisunov, V.M. Babich, B.S. Barkovsky, L.V. Bychkov // ETT. - 1970. - No. 7 - P. 10-11.

6. Vlasyevisky, S.V. Processes of switching the current of valves in rectifier-inverter converters of single-phase-direct current electric locomotives [Text]: Monograph / S.V. Vlasyevisky // Khabarovsk: Publishing house of the Far Eastern State University of Economics, 2000. - 112 p.

7. Tomilov V.S. Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives. Tomilov, O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, S.A. Boginsky // Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2020. - T. 65 No. 1. - P. 172–182. - DOI: 10.26731 / 1813-9108.2020.1 (65) .172-182.

8. Tomilov V.S. Modeling the operation of an alternating current electric locomotive in the regenerative braking mode / V.S. Tomilov // Bulletin of the Ural State University of Railways No. 2. 2021.S. 106-114.

Информация об авторах

Томилов Вячеслав Станиславович – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Мельниченко Олег Валерьевич – д.т.н., заведующий кафедрой кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Author

Vyacheslav S. Tomilov – post-graduate student of the Department of electric rolling stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Oleg V. Melnichenko – doctor of technical Sciences, head of the Department of "Electric rolling stock", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru