

Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока

В. С. Томилов¹✉, О. В. Мельниченко¹, С. Г. Шрамко¹, С. А. Богинский²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Дирекция тяги – филиал ОАО «РЖД» (ЦТ)

✉ slavatomilov22@gmail.com

Резюме

Одной из важнейших задач в соответствии со Стратегией научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 является снижение удельного расхода электроэнергии электроподвижным составом и повышение его энергетической эффективности. Работающие сегодня отечественные электровозы переменного тока имеют неудовлетворительные энергетические показатели как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения. В режиме рекуперации происходит значительное потребление реактивной мощности электровозом из тяговой сети, и вследствие этого коэффициент мощности имеет крайне низкий показатель, который не превышает значения 0,65 на высшей зоне регулирования напряжения. Наличие блоков балластных резисторов в силовой цепи, которое связано с принятым законом управления инверторами, не только ограничивает область тормозных характеристик электровоза, но и значительно снижает величину отдаваемой электроэнергии в контактную сеть. В данной статье авторами предлагается 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 статической устойчивости данного режима. С целью аналитического доказательства работоспособности данного способа были рассчитаны и построены внешние характеристики инвертора на базе IGBT-транзисторов, положительный наклон которых свидетельствует о возможности реализации режима рекуперативного торможения без балластного сопротивления. На разработанной имитационной модели электровоза переменного тока 2ЭС5К в среде «MatLab Simulink», работающего в режиме рекуперативного торможения, были получены и проанализированы кривые электромагнитных процессов, протекающих в силовой цепи электровоза.

Ключевые слова

электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзистор, рекуперативное торможение, коэффициент мощности, блок балластных резисторов, внешняя характеристика

Для цитирования

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

Информация о статье

поступила в редакцию: 19.11.2019, поступила после рецензирования: 25.12.2019, принята к публикации: 15.01.2020

AC-Fed electric locomotives energy performance increase

V. S. Tomilov¹✉, O. V. Mel'nichenko¹, S. G. Shramko¹, S. A. Boginskii²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²The Directorate of Traction, a branch of "RZD"

✉ slavatomilov22@gmail.com

Abstract

One of the most important tasks of the concept of "Strategy for the scientific and technical development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the long term up to 2030" is to reduce the specific consumption of electricity by electric rolling stock and increase its energy efficiency. The domestic AC electric locomotives operating today have unsatisfactory energy performance both in traction mode and in regenerative braking mode. In the recovery mode, there is a significant consumption of reactive power by an electric locomotive from the traction network, and, as a result, an extremely low power factor, not exceeding the value of 0.65 in the highest voltage regulation zone. The presence of blocks of ballast resistors in the power circuit, which is associated with the adopted inverter control law, not only limits the area of braking characteristics of the electric locomotive, but also significantly reduces the amount of electricity supplied to the contact network. Thus, in this article the authors propose a modern approach to solving the issue of energy efficiency of an electric locomotive in the recovery mode, namely: the use of a reversible converter based on IGBT transistors and the development of a method for implementing regenerative braking without ballast resistor blocks with the provision of static stability of this mode. To analytically prove the working efficiency of this method, the external characteristics of the inverter based on IGBT transistors were calculated and built, a positive slope of which indicates the implementability of regenerative braking without ballast resistance. The curves of electromagnetic processes occurring in the power circuit of the electric locomotive were obtained and analyzed using the developed simulation model of a 2ES5K alternating current electric locomotive in a MatLab Simulink environment operating in regenerative braking mode.

Keywords

AC electric locomotive, reversible converter, IGBT transistor, regenerative braking, power factor, ballast resistor block, external characteristic

For citation

Tomilov V. S., Mel'nichenko O. V., Shramko S. G., Boginskii S. A. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti raboty elektrovozov peremennogo toka [AC-fed electric locomotives energy performance increase]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 172–182. 10.26731/1813-9108.2020.1(65).172-182

Article Info

Received: 19.11.2019, Revised: 25.12.2019, Accepted: 15.01.2020

Введение

Применение режима ресурсосберегающего рекуперативного торможения на советских электровозах переменного тока начинается с электровозов ВЛ60Р с инвентронными преобразователями в 1960-х гг. Далее с разработкой тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) этот режим торможения применяется на электровозах серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65. Система рекуперативного торможения совершенствуется и в настоящее время с выпуском современных Российских электровозов серии «Ермак» и ЭП3в/и.

Применение рекуперативного торможения на электроподвижном составе (ЭПС) переменного тока имеет ряд преимуществ перед механическим (пневматическим) торможением:

- снижение износа тормозных колодок и бандажей колесных пар;
- значительная экономия электроэнергии и снижение нагрузок тяговых подстанций;
- увеличение жесткости тормозных характеристик электровоза;
- повышение безопасности движения тяжеловесных составов на трудных участках пути и др.

В 1964–1974 гг. на Дальневосточной железной дороге был проведен анализ применения рекуперации, который позволил выявить основные проблемы использования рекуперативного торможения на электровозах переменного тока [1–3]. В связи с принятым законом управления инвертором и наличия угла за-паса δ значительно увеличивается и потребление электровозом реактивной энергии из тяговой сети, вследствие чего коэффициент мощности электровоза не превышает значения 0,65. При этом применение в силовой цепи блоков балластных резисторов не только ограничивает область тормозных характеристик электровоза, но и отрицательно влияет на величину отдаваемой электровозом электроэнергии. Данные недостатки актуальны и на сегодняшний день и требуют технических решений в настоящее время.

Типовая упрощенная принципиальная схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Ниже представлена упрощенная принципиальная силовая схема электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения (рис. 1). Принятый закон

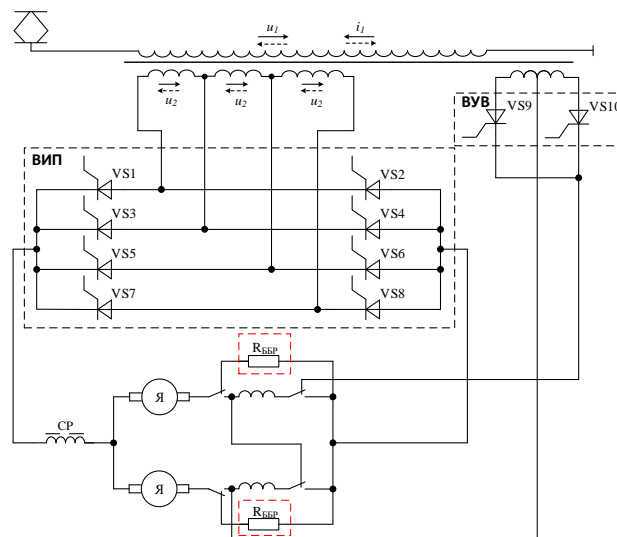


Рис. 1. Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Fig. 1. A simplified circuit schematic of the power circuits of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode

управления инвертором с постоянным углом запаса $\delta = \text{const}$ вынуждает использовать дополнительное активное сопротивление ($R_{ББР}$) в якорной цепи тяговых электрических двигателей (ТЭД). Основное назначение блоков балластных резисторов (ББР) – обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения, а именно, придание внешней характеристики генератора более крутого наклона. Наличие ББР в цепи негативно влияет на энергетические показатели электровоза. При рекуперации в этих резисторах бесполезно расходуется до 20 % рекуперированной электроэнергии [4]. Ранее проводимые исследования показывают, что падение напряжения на ББР ведет к уменьшению коэффициента мощности в среднем на 0,1 [5].

Применение ББР в силовых цепях не позволяет полноценно использовать четвертую зону регулирования напряжения ВИП, связано это непосредственно с падением напряжения на этих резисторах. Кроме того, вынужденное применение этих резисторов ведет к повышению массогабаритных показателей и усложнению конструкции ЭПС, например, для электровоза ВЛ80Р при суммарной мощности резисторов около 1 400 кВт увеличение его массы составляет более 2 т [6]. Более чем полувековая практика использования ББР показывает низкую надежность данных блоков. Таким образом, перед авторами стоит задача разработать способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока без применения блоков балластных резисторов в силовой цепи с обеспечением статической устойчивости этого режима.

Условие статической устойчивости режима рекуперативного торможения можно определить неравенством:

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_u}{dI_d}, \quad (1)$$

где U_d, U_u – соответственно напряжение на генераторе и инверторе, В; I_d – ток генератора, А.

Иными словами, статическую устойчивость определяет точка пересечения внешней характеристики генератора и инвертора. Внешней характеристикой многозонного тиристорного инвертора называется зависимость приложенного к генератору напряжения от выпрямленного тока, протекающего в цепи [7–9]. На значение величины напряжения, величины наклона внешней характеристики влияют: размеры активного и реактивного сопротивлений в цепи, а также электромагнитные процессы со стороны инвертора. Ниже показано семейство внешних характеристик тиристорного инвертора для законов управления им с постоянным углом опережения $\beta = \text{const}$ и постоянным углом запаса $\delta = \text{const}$ (рис. 2).

Наклон характеристик по мере увеличения протекающего в цепи тока зависит от закона управления инвертором. Принимая угол опережения открытия тиристорных ВИП постоянным $\beta = \text{const}$, внешняя характеристика инвертора имеет положительный наклон, и система рекуперативного торможения статически устойчива без применения ББР, однако данный способ не применяется ввиду его крайне низкой энергетической эффективности, в таком случае коэффициент мощности электровоза не превышает значения 0,48. Таким образом, можно сделать вывод о том, что имея внешнюю характеристику инвертора с положительным наклоном, есть возможность реализации рекуперативного торможения без блоков балластных резисторов. Сегодня на всех отечественных электровозах переменного тока инверторы управляются по закону с постоянным углом запаса $\delta = \text{const}$ при автоматическом его регулировании, коэффициент мощности увеличивается и принимает значение 0,65 на высшей зоне регулирования, но для устойчивой работы необходимо наличие балластного сопротивления в цепи.

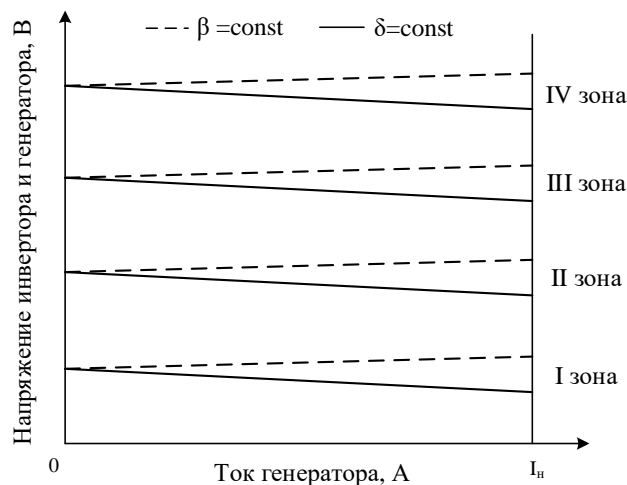


Рис. 2. Семейство внешних характеристик тиристорного инвертора электровоза переменного тока

Fig. 2. The family of external characteristics of the thyristor inverter of an AC electric locomotive

Предлагаемый способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока без блоков балластных резисторов

Стоит отметить, что тиристоры, применяющиеся в ВИП электровоза, не являются полностью управляемыми силовыми полупроводниковыми приборами. Следовательно, повлиять на наклон и положение внешней характеристики практически невозможно. Авторами предлагается вместо тиристорного ВИП рассмотреть транзисторный – выполненный на базе полностью управляемых IGBT-транзисторов [10–16]. Коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения с применением ВИП, выполненного на базе IGBT-транзисторов, в среднем увеличивается до значения 0,96 на высшей зоне регулирования напряжения. Показана упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного

тока с применением тяговых преобразователей на базе IGBT-транзисторов и исключением ББР из силовой цепи (рис. 3).

Предлагаемый способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока заключается в том, что при использовании IGBT-транзисторов в плечах ВИП, имеется возможность влиять на положение и наклон внешней характеристики инвертора на всех четырех зонах регулирования напряжения.

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 должно увеличиваться и напряжение инвертора. Достигнуть такого можно с помощью диодно-транзисторного разрядного плеча ВИП (VD9-VT9), а именно регулирования его рабочей зоны по переднему фронту напряжения (угол

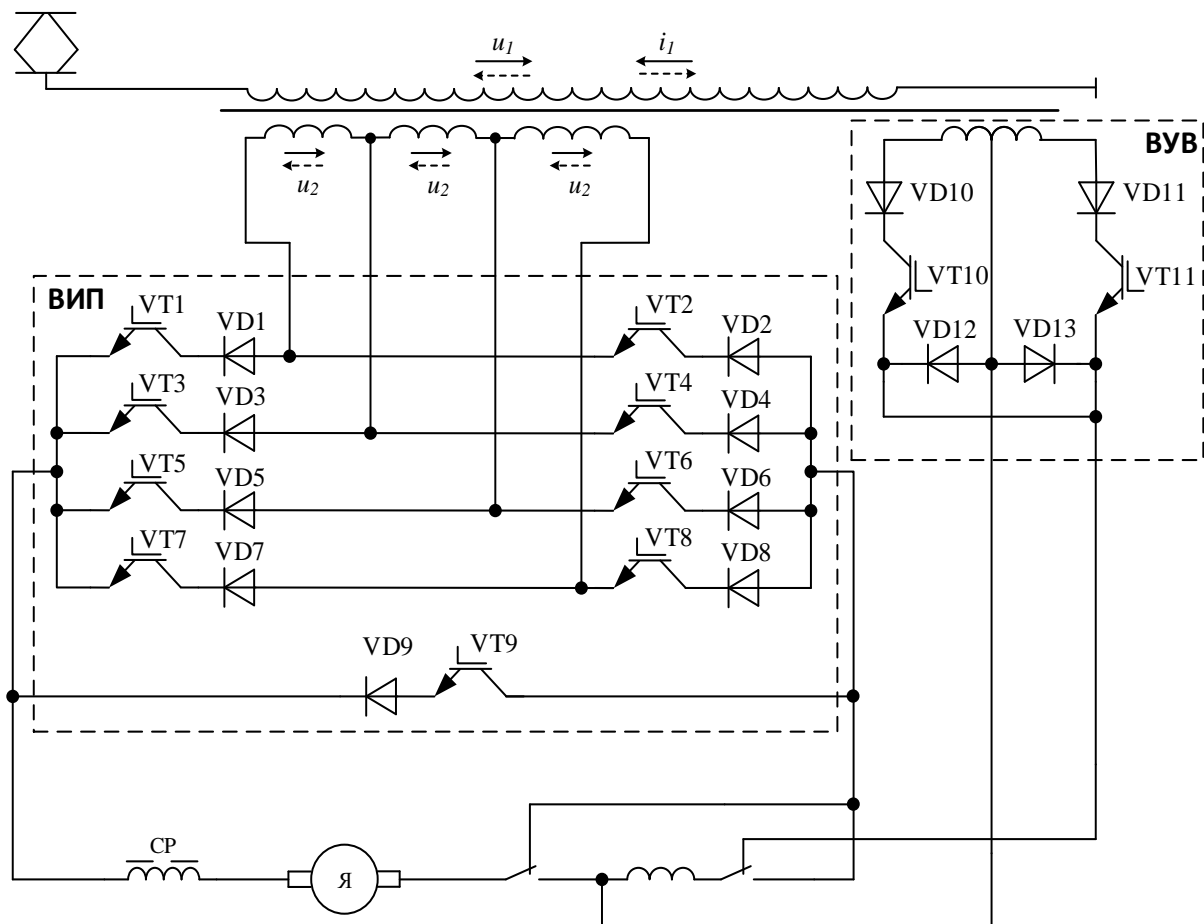


Рис. 3. Предлагаемая упрощенная принципиальная схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Fig. 3. The proposed simplified circuit schematic of the power circuits of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode

W_{wreg}). Приведена диаграмма выпрямленного напряжения инвертора на базе IGBT-транзисторов и показано его регулирование с помощью диодно-транзисторного разрядного плеча (рис. 4).

Расчет внешних характеристик тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя с законом управления $\delta = \text{const}$ и выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Расчет внешней характеристики инвертора проводится по двум точкам, первая точка – режим холостого хода, ток генератора при этом равен нулю. Вторая точка – номинальный режим работы, ток генератора равняется 810 А. Внешнюю характеристику можно описать следующими уравнениями:

1. Среднее напряжение ВИП в точке холостого хода определяется по формуле

$$U_{d0i} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{mi} = 0,9 \cdot U_{mi}, \quad (2)$$

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

2. Среднее напряжение ВИП в номинальном режиме работы с учетом падения напряжения

$$U_{dni} = U_{d0i} \pm \Delta U = U_{d0i} \pm I_{dn} \cdot R_{\Sigma n} - \Delta U_{\sigma}, \quad (3)$$

где I_{dn} – номинальный ток генератора, А; $R_{\Sigma n}$ – эквивалентное сопротивление, определяющее наклон характеристики инвертора, Ом; ΔU_{σ} – падение напряжения в плечах ВИП, В.

Стоит отметить, что в данном выражении знак плюс относится к режиму $\beta = \text{const}$, а знак минус – к режиму $\delta = \text{const}$ [4].

3. Эквивалентное сопротивление определяется по формуле

$$R_{\Sigma n} = \lambda \cdot \frac{2}{\pi} \times X_T + \xi \cdot R_T + R_d, \quad (4)$$

где λ – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций; ξ – отношение амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке тягового трансформатора к значению данного напряжения последующей зоны; X_T , R_m – соответственно индуктивное и активное сопротивление трансформатора, Ом; R_d – внутреннее сопротивление ТЭД, Ом.

4. Внутреннее сопротивление двигателя принимается без учета активного сопротивления обмотки возбуждения и имеет вид

$$R_d = R_{\text{оя}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{оя}}$, $R_{\text{ко}}$, $R_{\text{дп}}$ – активное сопротивление обмотки якоря, компенсационной обмотки и дополнительных полюсов соответственно, Ом.

Для ТЭД электровоза переменного тока серии «Ермак» НБ-514Б для расчета приняты следующие значения: сопротивление якорной обмотки – 0,0112 Ом и сопротивление компенсационной обмотки и добавочных полюсов – 0,0125 Ом [17].

Внешняя характеристика инвертора $U(I_d)$ нелинейная, но в расчетах можно принять допущение, что она прямолинейна [5]. Таким образом, в выражении (4) величины λ и ξ принять постоянными.

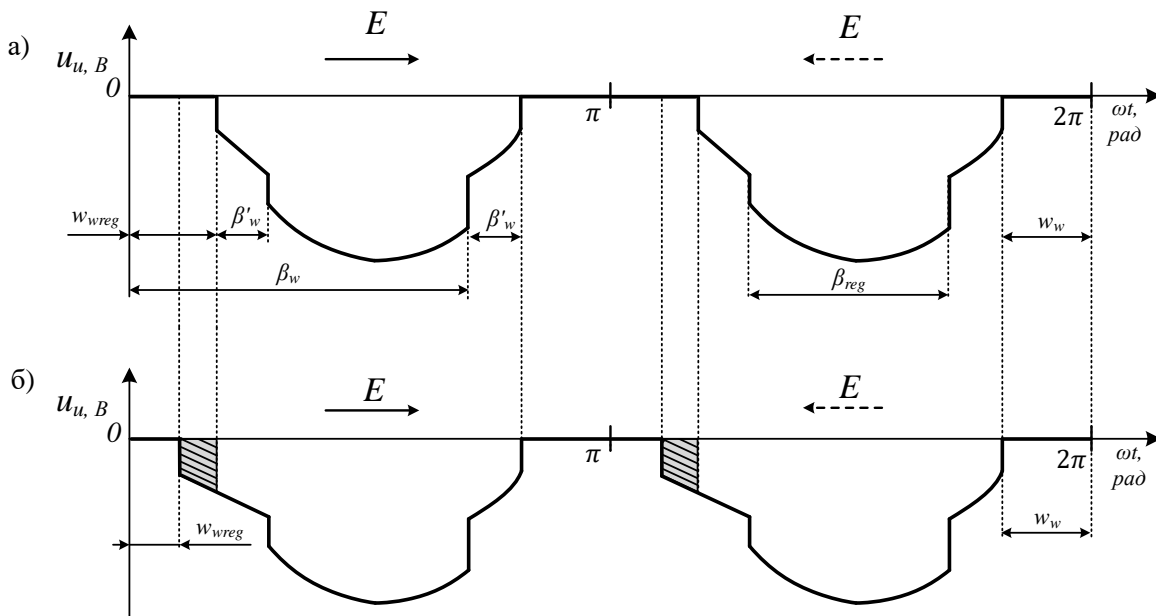


Рис. 4. Регулирование рабочей зоны диодно-транзисторного разрядного плеча:

a – режим холостого хода, $I_d = 0$; *b* – номинальный режим, $I_d = I_{ном}$

Fig. 4. Regulation of the working area of the diode-transistor discharge arm:

a – idle mode, $I_d = 0$; *b* – nominal mode, $I_d = I_{nom}$

Подставив выражение (4) в уравнение (3) получим формулу для определения второй точки внешней характеристики инвертора на базе тиристорных (6)

$$U_{dhi} = U_{d0i} - I_{dh} \cdot (\lambda \cdot \frac{2}{\pi} \cdot X_T + \xi \cdot R_T + R_d) - \Delta U_g. \quad (6)$$

Величину номинального индуктивного X_T и активного R_T сопротивления обмоток трансформатора на наивысшей зоне регулирования, приведенное к вторичной обмотке, определим по напряжению короткого замыкания трансформатора [18–20]:

$$X_{TH} = \frac{1,25 \cdot U_{кз} \cdot U_{dh}}{100 \cdot n_{\partial 6} \cdot I_{dh}}, \quad (7)$$

где $U_{кз}$ – реактивные потери напряжения в трансформаторе, определяемые из опыта короткого замыкания и выраженные в процентах от номинального первичного переменного напряжения. При приведении его ко вторичной обмотке принимается 10 %; $n_{\partial 6}$ – число генераторов, работающих на один ВИП.

Известно [18], что между величиной индуктивного и активного сопротивления обмоток трансформатора имеется соотношение (8)

$$R_{TH} = 0,12 \times X_{TH}. \quad (8)$$

Уравнение для определения второй точки внешней характеристики транзисторного инвертора имеет положительный наклон и выглядит следующим образом (9)

$$U_{dhi} = U_{d0i} + I_{dh} \cdot (\lambda \cdot \frac{2}{\pi} \times X_T + \xi \times R_T + R_d) - \Delta U_g. \quad (9)$$

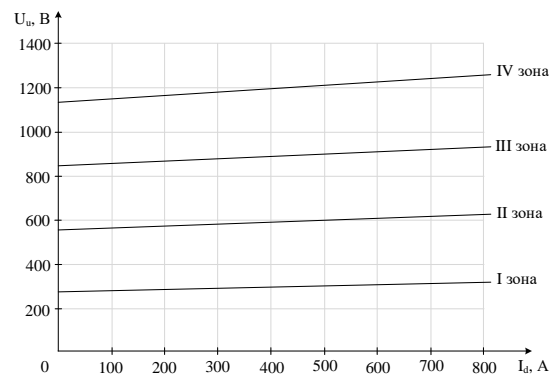
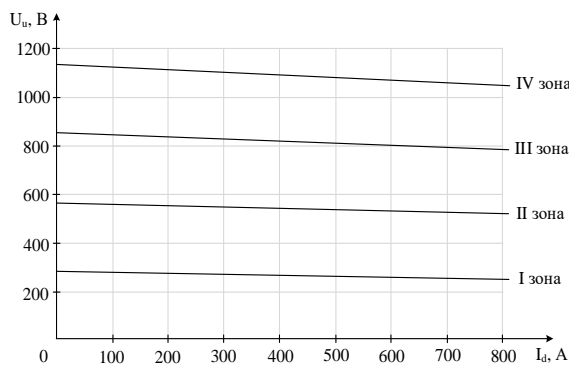
Стоит отметить, что величины активного и индуктивного сопротивления обмоток тягового трансформатора для тиристорного и транзисторного ВИП будут отличаться, так как в первом случае на один преобразователь работает два генератора, а во втором – один. Ниже приведены рассчитанные данные для построения внешних характеристик (табл. 1).

Показаны построенные внешние характеристики для обоих преобразователей по рассчитанным величинам (рис. 5).

Таблица 1. Полученные данные для построения семейства внешних характеристик тиристорного и транзисторного инвертора

Table 1. The data obtained for building a family of external characteristics of a thyristor and transistor inverter

Тип преобразователя	Режим работы	Ток генератора, I_d , А	Напряжение преобразователя в зонах, U_n , В			
			I	II	III	IV
Тиристорный	Холостой ход	0	284	567	851	1 134
	Номинальный режим	810	248	519	788	1 053
Транзисторный	Холостой ход	0	284	567	851	1 134
	Номинальный режим	810	310	619	932	1 252



a

б

Рис. 5. Семейство внешних характеристик инвертора:

a – тиристорного; *б* – транзисторного

Fig. 5. The family of external characteristics of the inverter:

a – thyristor; *b* – transistor

Для расчета внешних характеристик инвертора на базе IGBT-транзисторов применялось среднее значение угла регулирования рабочей зоны диодно-транзисторного разрядного плеча (VD9-VT9). Стоит отметить, что уменьшая или увеличивая время его работы можно придать внешней характеристики инвертора еще более крутой наклон.

Внешняя характеристика генератора без добавочного активного сопротивления располагается всегда выше характеристики инвертора и практически прямолинейна ввиду того, что внутреннее сопротивление двигателя невелико и с ростом тока падение напряжения в нем незначительно. Внешние характеристики инвертора на базе IGBT-транзисторов имеют положительный наклон.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что обе характеристики (генератора и инвертора)

пересекнутся в любом случае, обеспечивая тем самым статическую устойчивость режима рекуперативного торможения.

Результаты имитационного моделирования в среде «MatLab Simulink» электровоза переменного тока серии «Ермак» с типовым тиристорным и предлагаемым транзисторным выпрямительно-инверторными преобразователями

Далее показаны диаграммы электромагнитных процессов электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, полученные в имитационной интегрированной среде «MatLab Simulink» при работе со штатным тиристорным преобразователем (рис. 6).

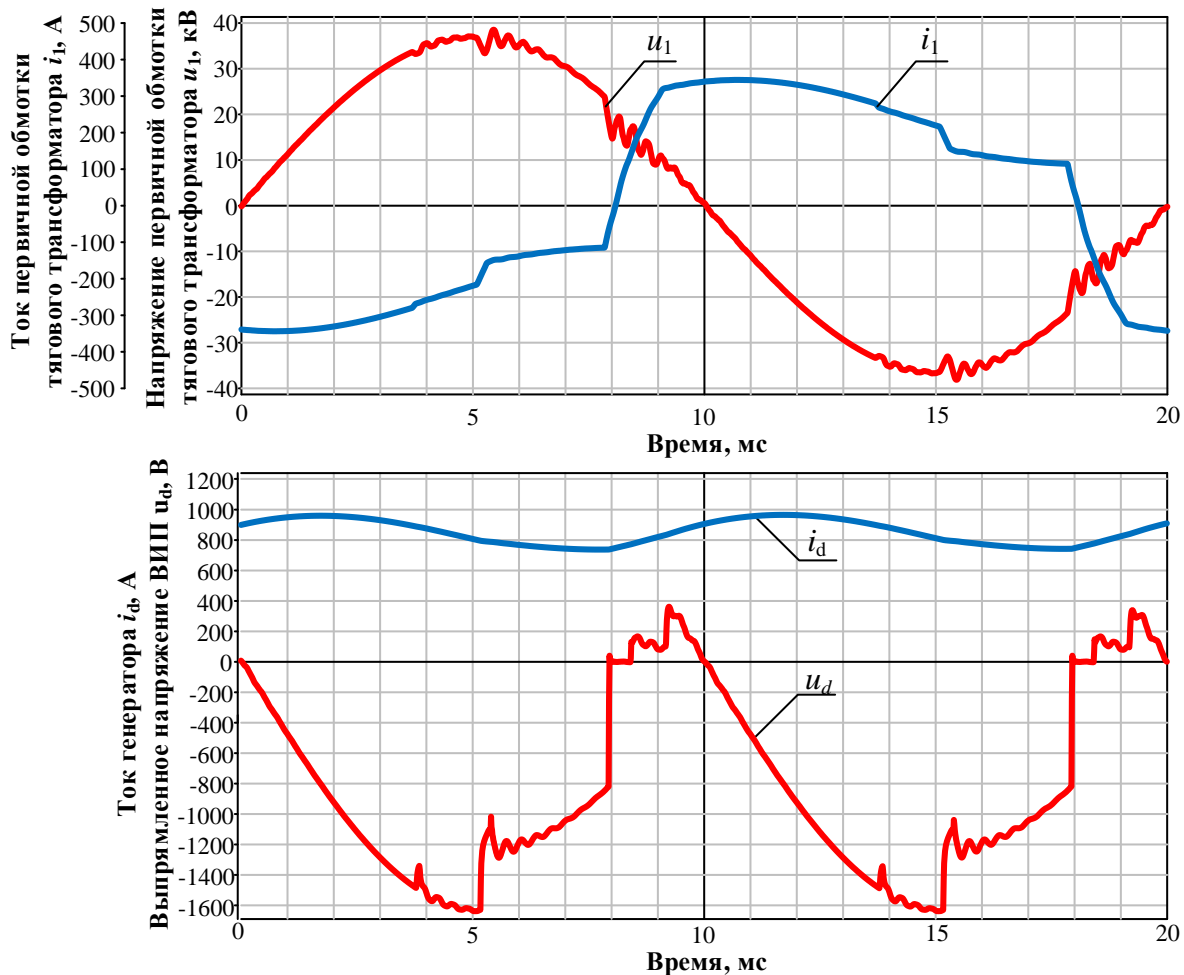


Рис. 6. Диаграммы электромагнитных процессов тока (i_1) и напряжения (u_1) на первичной обмотке тягового трансформатора, тока генератора (i_d) и напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя (u_d) электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с тиристорным выпрямительно-инверторным преобразователем

Fig. 6. Diagrams of electromagnetic processes of current (i_1) and voltage (u_1) on the primary winding of a traction transformer, generator current (i_d) and voltage of a reversible converter (u_d) of an alternating current electric locomotive in regenerative braking mode with thyristor reversible converter

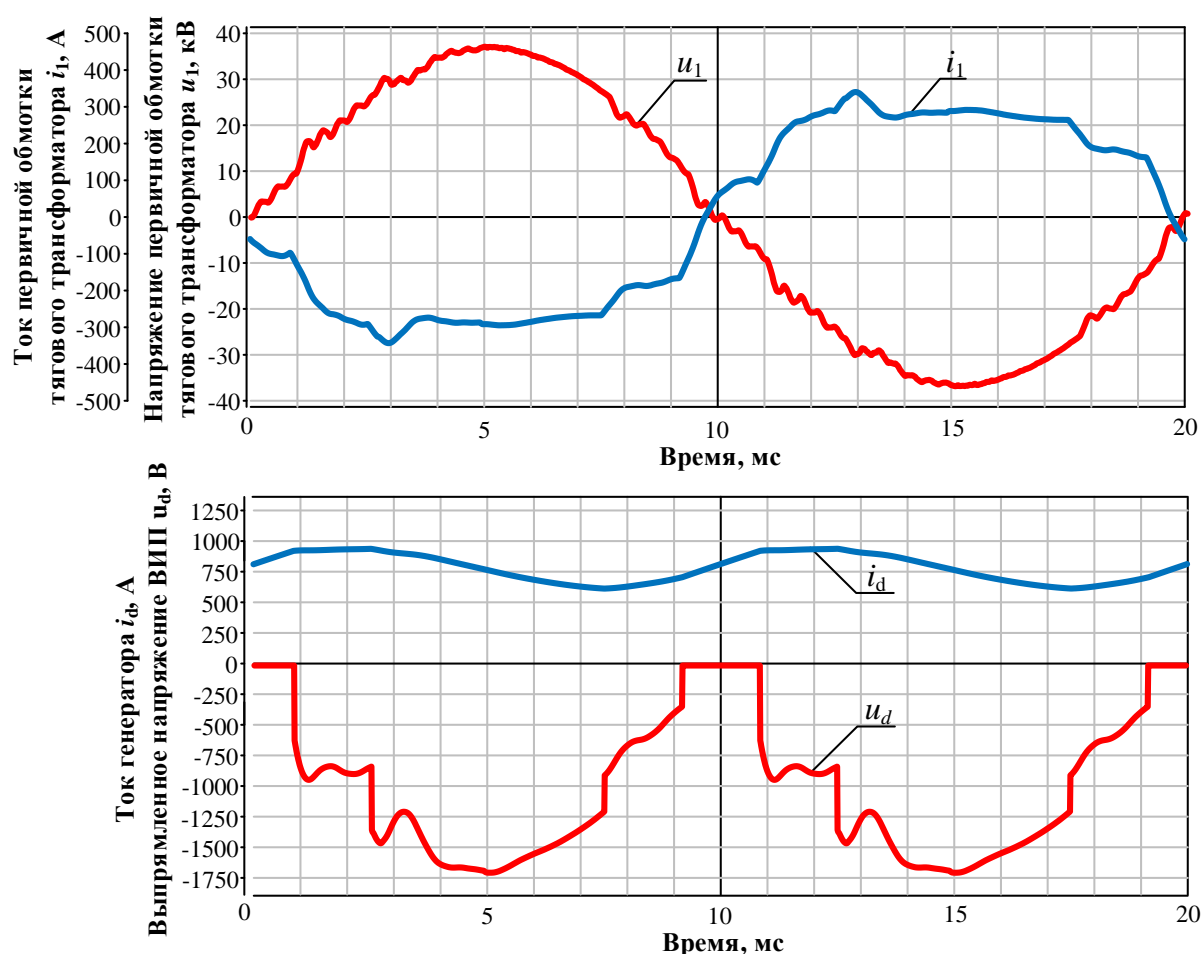


Рис. 7. Диаграммы электромагнитных процессов тока (i_1) и напряжения (u_1) на первичной обмотке тягового трансформатора, тока генератора (i_d) и напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя (u_d) электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов и исключением блоков балластных резисторов

Fig. 7. Diagrams of electromagnetic processes of current (i_1) and voltage (u_1) on the primary winding of a traction transformer, generator current (i_d) and voltage of a reversible converter (u_d) of an alternating current electric locomotive in regenerative braking mode with reversible converter based on IGBT transistors and exception ballast blocks

Приведены также диаграммы электромагнитных процессов электровоза при работе с предлагаемым ВИП на базе IGBT-транзисторов и исключением ББР из силовой цепи электровоза (рис. 7).

Из анализа полученных электромагнитных процессов видно, что угол сдвига фаз между током и напряжением на первичной обмотке тягового трансформатора при моделировании ВИП на IGBT-транзисторов значительно меньше, следовательно, потребление реактивной мощности электровозом тоже меньше, а коэффициент мощности – увеличивается в среднем до значения 0,96. Увеличивается и отдача электроэнергии в контактную сеть за счет исключения ББР в среднем на 15 %.

Ниже показана диаграмма напряжения инвертора на базе IGBT-транзисторов при реализации предлагаемого

способа управления им, с регулированием работы диодно-транзисторного разрядного плеча.

Внешняя характеристика транзисторного инвертора будет иметь наклон, напрямую зависящий от величины ΔU (см. рис. 8). Данную величину можно регулировать путем увеличения либо уменьшения времени работы диодно-транзисторного плеча VD9-VT9.

Следующий шаг авторов статьи предусматривает переход к реализации предлагаемого решения на опытном электровозе серии «Ермак».

Заключение

1. На сегодняшний день рекуперативное торможение на электровозах переменного тока имеет ряд недостатков: значительное потребление реактивной энергии, низкий коэффициент мощности, наличие балластного сопротивления в цепи и др.

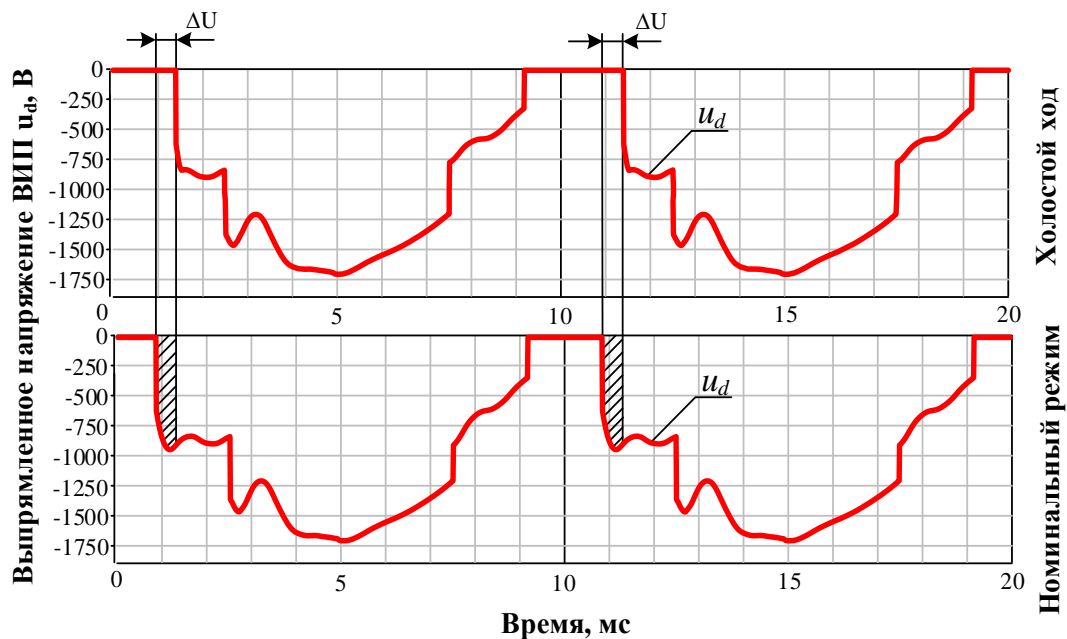


Рис. 8. Диаграмма напряжения инвертора на базе IGBT-транзисторов при реализации предлагаемого способа управления рабочей зоны диодно-транзисторного разрядного плеча по переднему фронту

Fig. 8. The voltage diagram of the inverter based on IGBT transistors when implementing the proposed method for controlling the working area of the diode-transistor discharge arm on the leading edge

2. Предлагаемое техническое решение подразумевает применение современного ВИП, выполненного на базе полностью управляемых IGBT-транзисторов, такое решение позволяет повысить коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения в среднем до значения 0,96.

3. Применение полностью управляемых силовых ключей в ВИП позволило разработать новый алгоритм управления диодно-транзисторным разрядным плечом (VD9-VT9), с помощью которого имеется возможность реализации рекуперативного торможения без ББР с обеспечением статической устойчивости режима рекуперации.

4. Рассчитанные внешние характеристики ВИП на базе IGBT-транзисторов имеют положительный

наклон и аналитически доказывают возможность реализации ресурсосберегающего рекуперативного торможения без ББР.

5. Исключение ББР из силовой цепи позволит увеличить возврат электроэнергии в среднем на 15 %, применить менее мощный мотор-вентилятор, для охлаждения выпрямительной установки возбуждения, расширить область тормозных характеристик электровоза до полной 4 зоны регулирования напряжения.

6. Проведенное имитационное моделирование доказало эффективность применения ВИП на базе IGBT-транзисторов, а также возможность реализации предлагаемого способа управления ВИП с исключением ББР.

Список литературы

1. Власьевский С.В. Эффективность и проблемы применения рекуперативного торможения на электровозах переменного тока [Текст] / С.В. Власьевский, В.В. Кравчук // Вестник ВЭЛНИИ. – 2005. – №2(49) – С. 147–158.
2. Власьевский С.В. Эффективность применения рекуперативного торможения на Дальневосточной железной дороге [Текст] / С.В. Власьевский, В.В. Кравчук А.М. Палихов // Вестник ВНИИЖТ. – 1975 – № 8 – С. 5–7.
3. Власьевский С.В. Электрическое рекуперативное торможение на электровозах переменного тока магистральных железных дорог. Проблемы и эффективность его применения [Текст] / С.В. Власьевский // ЭЭТ. – 2006. – № 1 – С. 21–24.
4. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.
5. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями [Текст] / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
6. Копанев А.С, Хоменко Б.И. Переходные процессы в силовой цепи электровоза переменного тока в тиристорными преобразователями в инверторном режиме. – Электричество, 1974, № 1. С. 60–65.
7. Осипов С.И. Теория электрической тяги [Текст]: учеб. для студентов техникумов и колледжей ж/д тр-та / С.И. Осипов, С.С. Осипов – М.: УМК МПС РФ, 2000. – 592 с.

8. Засорин С.Н. Электронная и преобразовательная техника [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / С.Н. Засорин, В.А. Мицкевич, К.Г. Кучма; под. ред. С.Н. Засорина. М.: Транспорт. – 1981. – 319 с.
9. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог [Текст] / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
10. Коласс А. Применение транзисторов IGBT на железнодорожном подвижном составе [Текст] / А. Коласс, Ж.-Э. Масслю // Железные дороги мира. – 2001. – № 2 – С. 37–41.
11. Ласка Б. Развитие тяговых преобразователей на транзисторах IGBT [Текст] / Б. Ласка // Железные дороги мира. – 2003. – № 11 – С. 32–39.
12. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Текст]: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.09.03 / О.В. Мельниченко. – Хабаровск., 2015. – 392 с.
13. Люттин Т. Тяговый преобразователь большой мощности на транзисторах IGBT [Текст] / Т. Люттин // Железные дороги мира. – 2001. – № 3 – С. 32–33.
14. Бакран М.М. Применение тяговых преобразователей на базе транзисторов IGBT [Текст] / М.М. Бакран // Железные дороги мира. – 2002. – № 5 – С. 34–38.
15. Мельниченко О.В. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT модулях [Текст] / О.В. Мельниченко, Д.А. Яговкин, А.Ю. Портной // Вестник института тяги и подвижного состава: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. ДВГУПС. – 2013. – Вып. 9. – С. 17–24.
16. Мельниченко О.В. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги [Текст] / О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, Д.А. Яговкин, С.Г. Шрамко // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46–51.
17. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации [Текст] / Новочеркасск: 2007. – Т. 1 – 635 с., Т. 2 – 640 с.
18. Ротанов Н.А. Проектирование систем управления электроподвижным составом [Текст] / под. ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
19. Быстрицкий Х.Я. Устройство и работа электровозов переменного тока [Текст] / Х.Я. Быстрицкий, З.М. Дубровский, Б.Н. Ребрик. – М.: Транспорт, 1982. – 406 с.
20. Захаревич С.В. Переходные и установившиеся процессы в схемах электроподвижного состава выпрямительного типа [Текст] / С.В. Захаревич. – Л.: Наука, 1966. – 240 с.

References

1. Vlas'evskii S.V., Kravchuk V.V. Effektivnost' i problemy primeneniya rekuperativnogo tormozheniya na elektrovozhakh peremennogo toka [Efficiency and problems of applying regenerative braking on AC electric locomotives]. *Vestnik VEINII*, 2005, No.2(49), pp. 147–158.
2. Vlas'evskii S.V., Kravchuk V.V., Palikhov A.M. Effektivnost' primeneniya rekuperativnogo tormozheniya na Dal'nevostochnoi zheleznoi doroge [The effectiveness of the application of regenerative braking on the Far Eastern Railway]. *Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute]*, 1975, No. 8, pp. 5–7.
3. Vlas'evskii S.V. Elektricheskoe rekuperativnoe tormozhenie na elektrovozhakh peremennogo toka magistral'nykh zheleznykh dorog. Problemy i effektivnost' ego primeneniya [Electric regenerative braking on AC electric locomotives of the main railways. Problems and effectiveness of its application]. *EET [Electronics and electrical equipment of transport]*, 2006, No. 1, pp. 21–24.
4. Trakhtman L.M. Elektricheskoe tormozhenie elektropodvizhnogo sostava [Electric braking of electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1965, 204 p.
5. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988, 311 p.
6. Kopanev A.S., Khomenko B.I. Perekhodnye protsessy v silovoi tsepi elektrovoza peremennogo toka v tiristornymi preobrazovatelyami v invertornom rezhime [Transients in the power circuit of an AC electric locomotive in thyristor converters in inverter mode]. *Elektrichestvo Publ.*, 1974, No. 1, pp. 60–65.
7. Osipov S.I., Osipov S.S. Teoriya elektricheskoi tyagi: ucheb. dlya studentov tekhnikumov i kolledzhei zh.-d. tr-ta [Theory of electric traction: a textbook for students of technical schools and colleges of railway transport]. Moscow: UMK MPS RF Publ., 2000, 592 p.
8. Zasorin S.N., Mitskevich V.A., Kuchma K.G. Elektronnaya i preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. dlya vuzov zh.-d. transporta [Electronic and conversion technology: a textbook for universities of railway transport]. In Zasorin S. N. (ed.). Moscow: Transport Publ., 1981, 319 p.
9. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnoi sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Rolling stock of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1980, 471 p.
10. Kolass A., Masslyu Zh.-E. Primenenie tranzistorov IGBT na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Application of IGBT transistors on railway rolling stock]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the World]*, 2001, No. 2, pp. 37–41.
11. Laska B. Razvitie tyagovykh preobrazovatelei na tranzistorakh IGBT [Development of traction converters on IGBT transistors]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the World]*, 2003, No. 11, pp. 32–39.
12. Mel'nichenko O.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti tyagovykh elektroprivodov elektrovozo peremennogo toka: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.09.03 [Increasing the energy efficiency of traction electric drives of electric locomotives of alternating current: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Khabarovsk, 2015, 392 p.
13. Lyuttin T. Tyagovyi preobrazovatel' bol'shoi moschnosti na tranzistorakh IGBT [Traction converter of high power with IGBT transistors]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the World]*, 2001, No. 3, pp. 32–33.

14. Bakran M.M. Primenenie tyagovykh preobrazovatelei na baze tranzistorov IGBT [Application of traction converters based on IGBT transistors]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the World]*, 2002, No. 5, pp. 34–38.

15. Mel'nichenko O.V., Yagovkin D.A., Portnoi A.Yu. Razrabotka novogo energosberegayushchego algoritma upravleniya VIP elektrovoza na IGBT modulyakh [Development of a new energy-saving control algorithm of the reversible converter of the electric locomotive using IGBT modules]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava: mezhvuz. sb. nauch. tr. [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock: Interuniversity proc.]*. In Stetsyuk A.E. and Gamolya Yu.A. (eds.) DVGUPS Publ., 2013, Iss. 9, pp. 17–24.

16. Mel'nichenko O.V., Portnoi A.Yu., Yagovkin D.A., Shramko S.G. Novyi vypryamitel'no-invertornyi preobrazovatel' dlya tyagovogo podvizhnogo sostava peremennogo toka s povyshennymi energeticheskimi kharakteristikami v rezhime tyagi [New reversible converter for traction rolling stock of alternating current with increased energy characteristics in traction mode]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport]*, 2014, No. 3, pp. 46–51.

17. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive main 2ES5K (3ES5K). An operation manual]. Novocheboksarsk: 2007, Vol. 1 – 635 p., Vol. 2 – 640 p.

18. Rotanov N.A. Proektirovanie sistem upravleniya elektropodvizhnym sostavom [Designing of control systems for electric rolling stock]. In Rotanov N. A. (ed.) Moscow: Transport Publ., 1986, 327 p.

19. Bystritskii Kh.Ya., Dubrovskii Z.M., Rebrik B.N. Ustroystvo i rabota elektrovozov peremennogo toka [The arrangement and operation of AC electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1982, 406 p.

20. Zakharevich S.V. Perekhodnye i ustanovivshiesya protsessy v skhemakh elektropodvizhnogo sostava vypryamitel'nogo tipa [Transient and steady-state processes in rectifier-type electric rolling stock circuits]. Leningrad: Nauka Publ., 1966, 240 p.

Информация об авторах

Томилов Вячеслав Станиславович – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Мельниченко Олег Валерьевич – д. т. н., заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Шрамко Сергей Геннадьевич – к. т. н., доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: novorossereg@mail.ru;

Богинский Сергей Антонович – заместитель начальника Дирекции тяги по планированию и контролю ремонта локомотивов, г. Иркутск, e-mail: news.1994@bk.ru.

Information about the authors

Vyacheslav S. Tomilov – Ph.D. student of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Oleg V. Mel'nichenko – Doctor of Engineering Science, Head of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Sergei G. Shramko – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: novorossereg@mail.ru

Sergei A. Boginskii – Deputy Head of the Directorate of Traction for the planning and control of repair of locomotives, Irkutsk, e-mail: news.1994@bk.ru.

DOI 10.26731/1813-9108.2020.1(65).182-191

УДК 629.463.3:656.222.1

Оценка опасности схода с рельсов вагонов-цистерн с различной высотой центра тяжести груза при движении по пути с реальными неровностями в плане и профиле

А. А. Тармаев¹✉, Г. И. Петров², Н. Ю. Соснов¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

✉ t38_69@mail.ru

Резюме

Работа посвящена численному (компьютерному) моделированию динамических процессов взаимодействия пути и грузового вагона, имеющих допустимые отклонения в содержании. В качестве базового вагона принята серийная модель четырехосной цистерны для бензина и светлых нефтепродуктов. Выбраны основные критерии динамического взаимодействия, безопасности движения, ходовых качеств и определены численные значения показателей. В качестве критериев, определяющих безопасность движения, приняты минимальное значение коэффициента запаса устойчивости колеса против схода с рельса, динамические величины рамных и боковых сил, действующих на колесные пары вагонов, а также минимальная величина контактных сил между пятником и подпятником (минимум контактных сил). Обоснован выбор рационального значения высоты центра тяжести, обеспечивающего безопасность движения с учетом скоростных режимов эксплуатации подвижного состава и сочетаний допустимых отклонений в содержании пути и ходовых частей экипажей. На основе полученных результатов проведен анализ и выработаны обоснованные рекомендации по выявлению влияния опасных значений высоты центра тяжести вагонов-цистерн на показатели безопасности движения и ходовых качеств. Определены допустимые скорости движения в диапазоне высот центра тяжести котла цистерны.