

Научная статья

УДК 629.423.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37



О РЕАЛИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОВОЗЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ОДНОФАЗНЫМ ОБРАТИМЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

В. А. Кучумов, И. Н. НикончукНаучно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализируется еще не решенная проблема реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения.

Материалы и методы. Рассмотрены теоретически возможные варианты работы однофазных обратимых преобразователей напряжения при рекуперативном торможении, при которых: 1) реактивная составляющая тока электровоза имеет емкостной характер, и действующий ток электровоза опережает его реактивную составляющую; 2) реактивная составляющая тока электровоза имеет индуктивный характер, и действующий ток электровоза опережает его активную составляющую. Показано, что первый из рассматриваемых вариантов работы однофазных обратимых преобразователей напряжения является лишь теоретически возможным, так как рекуперация тока в контактную сеть может быть осуществлена при очень малом напряжении в контактной сети, существенно меньшем наименьшего напряжения на токоприемнике. Второй из предложенных вариантов технически осуществим при отставании основной гармоники тока электровоза на угол, превышающий 90 эл. град., но заметно меньший 180 эл. град. Рекуперативное торможение с коэффициентом мощности, близким к единице, возможно лишь теоретически, а практически может быть реализован коэффициент мощности на уровне 0,8...0,9. Тангенс угла между действующим током и его активной составляющей должен быть больше (для некоторого запаса) частного от деления активного на индуктивное сопротивление тяговой сети между электровозом и тяговой подстанцией.

При управлении однофазными обратимыми преобразователями напряжения с постоянным углом сдвига необходимо дополнительно учитывать технологическое уменьшение активного сопротивления, например, из-за износа контактного провода.

Результаты. В статье показаны возможность и условия осуществления рекуперативного торможения на электровозах переменного тока. Согласно полученным результатам к разработке рекомендуется более прогрессивная система управления током электровоза с дополнительным каналом регулирования индуктивной составляющей тока рекуперации.

Обсуждение и заключение. Прогрессивная система управления может способствовать стабилизации напряжения на токоприемнике и совместно с каналом регулирования активной составляющей тока рекуперации обеспечивать поддержание величины напряжения на более высоком уровне, определяемом фактическими электрическими параметрами контактной сети и поездной обстановкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз переменного тока, тяговая сеть, тяговая подстанция, однофазный обратимый преобразователь напряжения, рекуперативное торможение, асинхронный тяговый двигатель, биполярный транзистор с изолированным затвором

Для цитирования: Кучумов В. А., Никончук И. Н. О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 31–37. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37



IMPLEMENTATION OF REGENERATIVE BRAKING ON THE AC LOCOMOTIVE WITH A MONOPHASE REVERSIBLE VOLTAGE CONVERTER

Vladislav A. Kuchumov, Ivan N. Nikonchuk

Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors analyse the problem of implementing regenerative braking on the AC locomotive with a monophasе reversible voltage converter.

Materials and methods. The article considered theoretically possible options for the operation of monophasе reversible voltage converters during regenerative braking, in which: 1) the reactive component of the electric locomotive current had a capacitive nature, and the operating current of the electric locomotive was ahead of its reactive component; 2) the reactive component of the electric locomotive current had an inductive nature, and the current of the electric locomotive was ahead of its active component. The research demonstrated that the former was only theoretically possible, since the regeneration of current into the contact network was carried out at a very low voltage, significantly less than the lowest voltage on the current collector. The latter was technically feasible in terms of the main harmonic of the electric locomotive current lagged by an angle exceeding of 90 electrical degree, but noticeably smaller than 180 electrical degree. Regenerative braking with a power factor close to unity was possible only theoretically, but in practice a power factor of 0.8–0.9 should be realized. The tangent of the angle between the effective current and its active component was greater (for a certain margin) than the quotient from dividing the active by the inductive resistance of the traction network between the electric locomotive and the traction substation. Moreover, it was necessary to consider the technological reduction of the ohmic resistance in the process of the monophasе reversible voltage transducer control (e. g. over the deterioration of contact wire).

Results. The article demonstrates the possibility and conditions for the regenerative braking implementation on AC locomotives. Hence, a more advanced electric locomotive current control system with an additional channel for regulating the inductive component of the recuperation current is recommended for development.

Discussion and conclusion. An advanced control system stabilizes the current collector voltage and with the channel for regulating the active component of the regeneration current provide for the voltage maintenance at a higher level, determined by the actual electrical parameters of the contact network and the train traffic.

KEYWORDS: AC locomotive, traction network, traction substation, monophasе reversible voltage converter, regenerative braking, asynchronous tractive motor, bipolar insulated gate transistor

For citation: Kuchumov V.A., Nikonchuk I.N. Implementation of regenerative braking on the AC locomotive with a monophasе reversible voltage converter. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):31–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37>.

Введение. На российских железных дорогах, электрифицированных однофазным переменным током частотой 50 Гц и напряжением 25 кВ, в массовом порядке эксплуатируются грузовые электровазны семейства «Ермак» (2ЭС5К и т. п.) с коллекторными тяговыми двигателями (КТД). На этих электровазонах установлены выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), обеспечивающие режимы тяги и рекуперативного торможения (РТ), выполняемые с пониженным коэффициентом мощности [1, 2].

На замену таким электровазонам разрабатываются и поставляются на линию электровазны нового поколения с однофазными обратимыми преобразователями напряжения (ООПН), способными работать в четырех квадрантах комплексной плоскости, и поэтому первоначально названные разработчиками из ФРГ [3, 4, 5] четырехквадрантными. При работе электровазона в тяговом режиме между основными гармониками напряжения на токоприемнике и тока в сетевой обмотке тягового трансформатора поддерживается заданное значение угла сдвига $\varphi_1 = 0$, поэтому в широком диапазоне нагрузок коэффициент мощности практически равен 1 [6]. Напротив, работа электровазона в режиме РТ с заданным значением угла сдвига $\varphi_1 = 180$ эл. град. оказалась неудовлетворительной [7].

Исследование причины неудовлетворительной работы РТ и поиск практических предложений проведены на расчетной схеме одностороннего питания одного электровазона с ООПН и асинхронными тяговыми двигателями (АТД) от тяговой подстанции (бесконечно большой мощности) через тяговую сеть с активным R и индуктивным X сопротивлениями на частоте 50 Гц (рис. 1). АТД с линейным напряжением 1200...1400 В получают питание от индивидуальных автономных инверторов напряжения (АИН). В звене постоянного напряжения U_d установлен мощный фильтровой конденсатор C с номинальным напряжением на уровне 1500...1800 В. В каждом плече ООПН и АИН установлены по одному биполярному транзистору с изолированным затвором (БИТЗ) 33 класса на ток 1200...1500 А. Тяговый трансформатор выполнен с чередующимися кольцами обмоток высокого (сетевой обмотки с номинальным напряжением $U_c = 25$ кВ) и низкого напряжения (тяговая обмотка с номинальным напряжением $U_t = 1...2$ кВ) [8]; благодаря такой конструкции трансформатор имеет увеличенную индуктивность рассеяния, препятствующую проникновению в тяговую сеть высших гармоник тока и придающую ООПН как источнику питания свойства источника тока [6].

Основным преимуществом ООПН является его возможность, благодаря использованию быстродействующих БИТЗ, сформировать практически синусоидальный ток в тяговой и, соответственно, в сетевой

обмотках трансформатора, причем ток в сетевой обмотке может быть сдвинут относительно напряжения U_c на ней на любой, наперед заданный, угол сдвига φ .

Целью работы является научное обоснование основных технических требований к режиму РТ электровазона с ООПН.

Рассмотрены оба теоретически возможных варианта [9, 10, 11] режима работы ООПН:

- реактивная составляющая тока I_p электровазона имеет емкостной характер, и активная составляющая тока I_a опережает действующий ток I на угол сдвига φ (рис. 2, а);
- реактивная составляющая тока I_p имеет индуктивный характер, и действующий ток I опережает его активную составляющую I_a также на угол сдвига φ (рис. 2, б).

Напряжения и токи векторных диаграмм [8, 9], представленных на рис. 2, связаны между собой уравнением

$$U_n^2 = (U_c^2 - IR \cos \varphi \pm IX \sin \varphi)^2 + (IX \cos \varphi \pm IR \sin \varphi)^2, \quad (1)$$

где U_n — напряжение тяговой подстанции, В.

В уравнении (1) и в уравнении (2) знаки вычитания при $\sin$ относятся к рис. 2, а, знаки сложения — к рис. 2, б.

Обозначенный на рисунке угол сдвига φ может изменяться в пределах $0 \leq \varphi \leq 90$ эл. град.

Поделив обе части уравнения (1) на I^2 , получим

$$(Z_c - R \cos \varphi \pm X \sin \varphi)^2 = Z_n^2 - (X \cos \varphi + R \sin \varphi)^2, \quad (2)$$

где $Z_c = U_c / I$ имеет размерность Ом и может быть условно названо расчетным сопротивлением тяговой подстанции, внутреннее сопротивление которой не учитывается; Z_n — фактическое сопротивление тяговой подстанции, $Z_n = U_n / I$.

После преобразований получается

$$Z_n^2 - Z_c^2 = R^2 + X^2 + 2Z_c(R \cos \varphi \pm X \sin \varphi), \quad (3)$$

где знаки сложения при $\sin$ относятся к рис. 2, а, вычитания — к рис. 2, б.

Левая часть этого уравнения дает для анализа три следующих варианта:

- 1) $Z_c > Z_n$. Очевидно, что это неравенство является условием РТ, которое следует понимать в соответствии со следующим определением: «Рекуперативное торможение — торможение железнодорожного подвижного состава, которое осуществляется посредством электрического тормоза и при котором высвобождаемая при переводе тяговых двигателей в генераторный режим электрическая энергия передается в контактную сеть» [12].

- 2) $Z_c < Z_n$. При этом условии РТ невозможно.

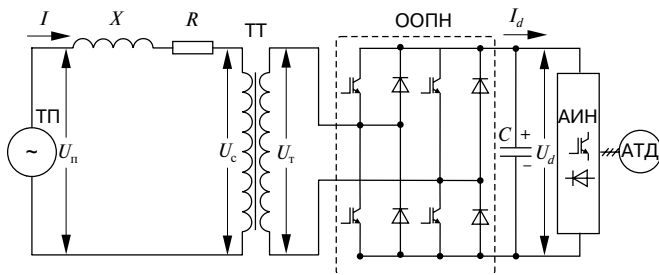


Рис. 1. Расчетная схема питания электровоза с ООПН от тяговой подстанции (ТП):

ТТ — тяговый трансформатор; АИН — автономный инвертор напряжения; АТД — асинхронный тяговый двигатель; I — ток тяговой сети частотой 50 Гц, А; I_d — выпрямленный ток между ООПН и АИН, А; U_n — напряжение тяговой подстанции, В; U_c — напряжение сетевой обмотки трансформатора электровоза, В; U_t — напряжение тяговой обмотки трансформатора электровоза, В; U_d — напряжение на фильтровом конденсаторе, В; C — фильтровый конденсатор; X — индуктивное сопротивление тяговой сети на частоте 50 Гц, Ом; R — активное сопротивление тяговой сети, Ом

Fig. 1. Calculated power supply model for an electric locomotive with monophasе reversible voltage converters of a traction substation: ТТ — traction transformer; АИН — autonomous voltage inverter; АТД — asynchronous traction motor; I — current of the traction network at the 50 Hz frequency, A; ООПН — monophasе reversible voltage converter; ТП — traction substation; I_d — rectified current between ООПН and АИН, A; U_n — voltage of the traction substation, V; U_c — voltage of the mains winding of the electric locomotive transformer, V; U_t — voltage of the traction winding of the electric locomotive transformer, V; U_d — voltage across the filter capacitor, V; C — filter capacitor; X — inductive resistance of the traction network at the 50 Hz frequency, Ohm; R — active resistance of the traction network, Ohm

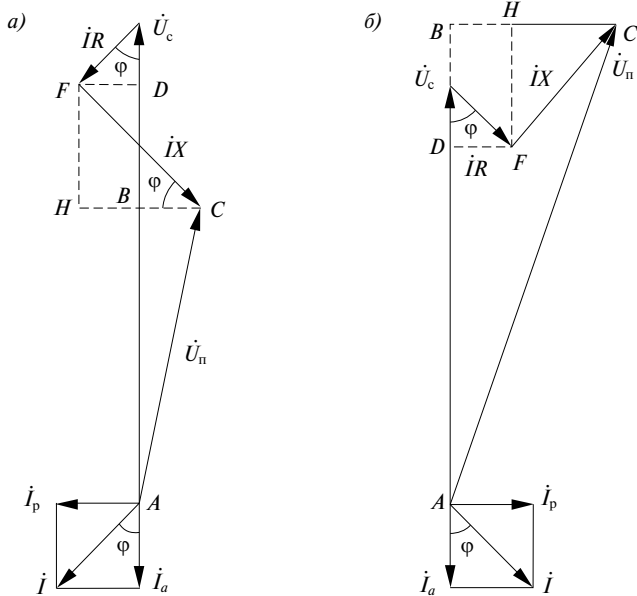


Рис. 2. Векторные диаграммы токов, напряжений и падений напряжений для режима электрического торможения при опережающем (а) и отстающем (б) токах:

IR — падение напряжения на активном сопротивлении тяговой сети, В; IX — падение напряжения на индуктивном сопротивлении тяговой сети, В

Fig. 2. Vector diagrams of currents, voltages and voltage drops for the electric braking mode with leading (a) and lagging (b) currents: IR — voltage drop across the active resistance of the traction network, V; IX — voltage drop on the inductive resistance of the traction network, V

3) $Z_c = Z_n$. Это уравнение для построения линии ограничения области теоретически возможного РТ.

Ограничения режима. Введем в (3) новое обозначение

$$Z_{nc} = Z_n = Z_c, \quad (4)$$

где Z_{nc} — расчетное сопротивление при условии $Z_n = Z_c$.

Тогда с учетом (4) получаем уравнение

$$Z_{nc} = (R^2 + X^2) / 2(R \cos \varphi - X \sin \varphi), \quad (5)$$

определяющее линию ограничения области РТ (рис. 3, линия 1).

При построении этой зависимости отрицательные значения угла сдвига φ соответствуют первому варианту режима работы ООПН, при котором активная составляющая тока электровоза опережает действующий ток (рис. 2, а), а положительные значения — второму варианту, при этом угол сдвига изменяется во всем возможном диапазоне от -90 до 90 эл. град. (рис. 2, б).

В общем случае тяговая сеть является электрической цепью с распределенными параметрами [13]. Определению величин активного и индуктивного сопротивлений тяговой сети посвящен ряд работ [13, 14, 15, 16]. В [14, 15] указаны погонные параметры продольного активного сопротивления $r = 0,107$ Ом/км, индуктивного сопротивления $x = 0,257$ Ом/км, поперечных активного сопротивления $r_0 = 6$ Мом/км и емкостного сопротивления $x_0 = 10,97$ МОм/км. Последние два сопротивления слишком велики и в электрических расчетах тяговых сетей промышленной частоты 50 Гц [9, 10] не учитываются. Таким образом, для участка одностороннего питания электровоза длиной 20 км остаются два сопротивления: $R = 2,14$ Ом и $X = 5,14$ Ом; эти параметры приняты в расчет для линии 1, ограничивающей область РТ по критерию $U_c > U_n$ (рис. 3). Зависимость $Z_{nc}(\varphi)$ имеет разрывной характер, ее начальный участок асимптотически приближается к граничному значению угла φ , определенному в виде

$$\varphi_r = \arctg(R/X) = 22,6 \text{ эл. град.} \quad (6)$$

и $\cos 22,6 \text{ эл. град.} = 0,93$.

На рис. 3 также изображена линия 2, ограничивающая область РТ по величине минимального значения Z_{nc} в эксплуатации. Минимальное значение Z_{nc} определяется следующим образом: рекуперлируемая мощность 7000 кВт 8-осного электровоза с АТД соответствует току $I = 7000/19 = 370$ А. Следовательно, $Z_{nc \min} = 19000/370 \approx 50$ Ом. Практическое значение имеет линия ограничения 1, лежащая выше линии 2, когда результат расчета по формуле (5)

почти не отличим от вертикальной линии с абсциссой $\varphi_r = 22,6$ эл.град. (линия 3).

Дополнительно можно определить точку пересечения линии с осью ординат при $\varphi = 0$, соответствующую ординате:

$$Z_{nc} = (X^2 + R^2) / 2R = 7,24 \text{ Ом.} \quad (7)$$

Это довольно низкое значение, намного меньшее $Z_{nc \min} \approx 50$ Ом и подтверждающее практическую невозможность реализации РТ при $\cos \varphi = 0$, о чем уже упоминалось выше.

Другим выводом из анализа зависимостей рис. 3 является факт технической невыполнимости РТ в соответствии с векторной диаграммой рис. 2, а. РТ электропоездов с ООПН и АТД следует выполнять исключительно в соответствии с векторной диаграммой рис. 2, б; при этом рабочая точка должна лежать выше горизонтальной штриховой линии и правее вертикальной сплошной линии, т. е. практически с вертикальной линией на абсциссе φ_r .

На рис. 3, чтобы не увеличивать без нужды размера графика, показана лишь небольшая часть разрешенной площади для применения РТ в виде выделенной прямоугольной области; эта область имеет продолжение вдоль оси ординат до бесконечности, так как ток I может уменьшаться до 0, и вдоль оси абсцисс до угла $\varphi = 90$ эл. град. (исключительно).

Результаты анализа. При всех величинах напряжения на сетевой обмотке трансформатора, лежащих внутри пределов по [1], следует соблюдать равенство

$$\arctg(R/X) < \varphi < 90^\circ. \quad (8)$$

При этом угол φ не меняется с изменением длины тяговой сети между электропоездом и тяговой подстанцией.

Угол отставания вектора основной гармоники тока от вектора основной гармоники напряжения должен лежать в пределах

$$90^\circ < \varphi_1 < (180^\circ - \arctg(R/X)). \quad (9)$$

Отношение R/X не является постоянным, так как в процессе эксплуатации железнодорожных линий происходит износ контактного провода и может меняться состояние рельсового пути. Поэтому неравенство (9) следует откорректировать в виде

$$\varphi_1 < 180^\circ - \arctg(R_{\max}/X_{\min}). \quad (10)$$

Угол сдвига φ должен быть несколько больше угла φ_r вследствие необходимости создания технологического запаса в практической реализации системы управления ООПН, возможного вредного влияния

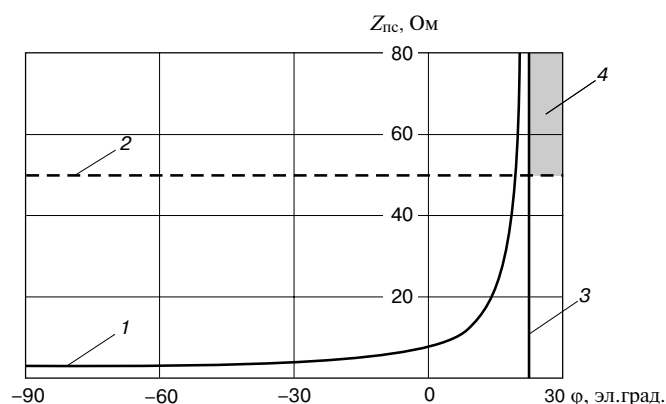


Рис. 3. Область РТ по критерию $U_c > U_n$:

1 — ограничение по критерию $U_c > U_n$; 2 — ограничение по наименьшему напряжению на токоприемнике [1]; 3 — угол φ_r при увеличении Z_{nc} до бесконечности; 4 — область реализации режима РТ

Fig. 3. Regenerative braking area according to the $U_c > U_n$ criterion:

1 — $U_c > U_n$ criterion limitation; 2 — limitation at the lowest voltage of the current collector [1]; 3 — angle φ_r with increasing Z_{nc} to infinity; 4 — implementation area of the regenerative braking mode

переходных процессов в тяговой сети и даже изменения частоты питающего напряжения.

Заключение. Несмотря на замену ВИП на ООПН и КТД на АТД рекуперативный тормоз на электропоездах переменного тока сохраняет все свои характерные принципиальные черты:

- векторная диаграмма напряжения и тока сохраняется по рис. 2, б;
- угол отставания вектора основной гармоники тока от вектора основной гармоники напряжения вычисляется по одинаковому неравенству $\varphi_1 < (180^\circ - \varphi)$. Угол φ для электропоездов семейства «Ермак» рассчитывается по формуле

$$\varphi = \delta + \gamma / 2,$$

где δ — угол запаса; γ — угол коммутации тока в однофазном зависимом инверторе тока, именуемом ВИП.

При времени включения тиристоров 150...200 мкс угол δ может примерно равняться 5 эл. град, но во избежание нарушения инверторного режима в реальных условиях эксплуатации этот угол устанавливается равным 20...25 эл. град., а часто и большим, что вызывает снижение коэффициента мощности с 0,85 до 0,65 и менее. Кроме того, на этих электропоездах часть энергии поглощается в стабилизирующих резисторах, необходимых для устойчивости РТ.

Постоянный нерегулируемый угол φ для электропоездов нового поколения с ООПН и АТД равен $\varphi = \arctg(R/X)$ с некоторым пока неизвестным запасом, однако можно предположить, что коэффициент

мощности не будет понижаться ниже 0,8. Поэтому следует ожидать повышения энергетических показателей режима РТ.

Теоретически доказано отсутствие других вариантов РТ на электровазгах переменного тока с ООПН и АТД. Рекомендуется к разработке на перспективу более прогрессивная система управления током электровазга с дополнительным каналом регулирования индуктивной составляющей тока рекуперации, которая способствует стабилизации напряжения на токоприемнике и совместно с каналом регулирования активной составляющей тока рекуперации обеспечивает поддержание величины напряжения на более высоком уровне, определяемом фактическими электрическими параметрами контактной сети и поездной обстановкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 6962–75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: дата введения 1977-01-01. М.: Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР, 1976. 8 с.
2. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровазги переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 312 с.
3. Depenbrock M. Einphasen–Stromrichter mit sinusformigen Netzform und gut geglatteten Gleichgrossen // ETZ–A. 1973. Vol. 94, Heft 8. S. 466–471.
4. Körber J. Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren // Elektrische Bahnen. 1974. No. 45, Heft 3. S. 52–59.
5. Guthlein H. Die neue elektrischer Lokomotive 10 der Deutschen Bundesbahn in Drehstromantriebstechnik // Elektrische Bahnen. 1974. No. 45, Heft 9. S. 248–257.
6. Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q–S преобразователями // Электротехника. 1993. № 5. С. 23–31.
7. Игин В. Н. Энергоэффективность локомотивов в зеркале статистики // Локомотив. 2016. № 8. С. 2–6.
8. Усвицкий С. А. Пути создания нового поколения магистральных электровазгов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровазгостроения (Вестник ВЭЛНИИ). 2009. № 2 (58). С. 17–33.
9. Марквардт К. Г. Электрообеспечение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
10. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электрообеспечение железных дорог: учеб. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.
11. Быков Ю. Г., Иньков Ю. М., Симонов М. Д. Регулирующие характеристики однофазного обратимого преобразователя напряжения // Электричество. 1996. № 9. С. 63–66.
12. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР/ТС 001/2011 (в редакции Решения Совета Евразийской экономической комиссии от 14 сентября 2021 г. № 90) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvignoisostev%20PID.pdf> (дата обращения: 11.02.2022).
13. Кулинич Ю. М. Электронная преобразовательная техника: учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. 202 с.
14. Ермоленко Д. В. Повышение электромагнитной совместимости системы тягового электрообеспечения с тиристорным

электроподвижным составом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09. М.: ВНИИЖТ, 1979. 22 с.

15. Савоськин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть — электровазг» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.

16. Сопровождения электровазговой сети однофазного переменного тока железных дорог / Е. П. Фигурнов [и др.] // Электричество. 2021. № 11. С. 35–44.

REFERENCES

1. GOST 6962–75. Transport elektrifitsirovanny s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy [Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row], data vvedeniya [introduction date] 1977-01-01. Moscow: Gos. komitet standartov Soveta Ministrov SSSR [State committee of standards of the Council of Ministers of the USSR] Publ.; 1976. 8 p. (In Russ.).
2. Tikhmenev B. N., Kuchumov V. A. Elektrovozzy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ.; 1988. 312 p. (In Russ.).
3. Depenbrock M. Einphasen–Stromrichter mit sinusformigen Netzform und gut geglatteten Gleichgrossen. ETZ–A. 1973;94(8):466–471.
4. Körber J. Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren. Elektrische Bahnen. 1974;45(3):52–59.
5. Guthlein H. Die neue elektrischer Lokomotive 10 der Deutschen Bundesbahn in Drehstromantriebstechnik. Elektrische Bahnen. 1974;45(9):248–257.
6. Litovchenko V. V. Opredelenie energeticheskikh pokazateley elektropodvizhnogo sostava peremennogo toka s 4q–S preobrazovatelyami [Determination of energy indicators of AC electric rolling stock with 4q–S converters]. Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering. 1993;(5):23–31. (In Russ.).
7. Igin V. N. Energoeffektivnost' lokomotivov v zerkale statistiki [Energy efficiency of locomotives in the mirror of statistics]. Lokomotiv = Locomotive. 2016;(8):2–6. (In Russ.).
8. Usvitskiy S. A. Puti sozdaniya novogo pokoleniya magistral'nykh elektrovozov [Ways to create a new generation of mainline electric locomotives]. Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya (Vestnik VELNII) = Bulletin of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Building (VELNII Bulletin). 2009;2(58):17–33. (In Russ.).
9. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ.; 1982. 528 p. (In Russ.).
10. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. Elektrosnabzhenie zheleznnykh dorog: ucheb. [Power supply of railways: Textbook]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ.; 2014. 432 p. (In Russ.).
11. Bykov Yu. G., In'kov Yu. M., Simonov M. D. Regulirovochnye kharakteristiki odnofaznogo obratimogo preobrazovatelya napryazheniya [Regulating features of a monophas reversible voltage converter]. Elektrichestvo = Electricity. 1996;(9):63–66. (In Russ.).
12. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: tekhnicheskiiy reglament Tamozhennogo soyuza: TR/TS 001/2011 (v redaktsii Resheniya Soveta Evraziyskoy ekonomicheskoy komissii ot 14 sentyabrya 2021 g. № 90) [On the safety of railway rolling stock: technical regulations of the Customs Union: TR/TS 001/2011 (as amended by the Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated September 14, 2021 No. 90)]. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvignoisostev%20PID.pdf> (access date: 11.02.2022). (In Russ.).
13. Kulinich Yu. M. Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transporta [Electronic

converting technology: Tutorial for students of transport universities]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2015. 202 p. (In Russ.).

14. Ermolenko D. V. Povyshenie elektromagnitnoy sovmestimosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s tiristornym elektropodvizhnym sostavom: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the electromagnetic compatibility of the traction power supply system with thyristor electric rolling stock: Cand. ... Dr. Tech. Sci. Synopsis]. Moscow: VNIIZhT Publ.; 1979. 22 p. (In Russ.).

15. Savos'kin A. N., Kulnich Yu. M., Alekseev A. S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoy sisteme "kontaktnaya set'—elektrovoz" [Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system "contact network—electric locomotive"]. *Elektrichestvo = Electricity*. 2002;(2):29–35. (In Russ.).

16. Figurnov E. P., Bykadorov A. L., Zharkov Yu. I., et al. Soprotivleniya elektroyagovoy seti odnofaznogo peremennogo toka zheleznikh dorog [Resistances of the electric traction network of monophasic AC of railways]. *Elektrichestvo = Electricity*. 2021;(11):35–44. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владислав Алексеевич КУЧУМОВ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, НЦ «Тяга поездов», АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Иван Николаевич НИКОНЧУК,

аспирант, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1032809, <https://orcid.org/0000-0002-4579-4743>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladislav A. KUCHUMOV,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, SC "Traction of Trains", JSC "VNIIZhT", AuthorID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Ivan N. NIKONCHUK,

Post-graduate, JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1032809, <https://orcid.org/0000-0002-4579-4743>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владислав Алексеевич КУЧУМОВ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований (50%).

Иван Николаевич НИКОНЧУК. Обзор основных результатов эксплуатации электропоездов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями в режиме рекуперативного торможения, методика расчета, анализ результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladislav A. KUCHUMOV. Formation of the direction of the research, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm (50%).

Ivan N. NIKONCHUK. Review of the main results of the operation of AC locomotives with commutator traction motors in the regenerative braking mode, calculation methodology, analysis of the results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.02.2022, первая рецензия получена 17.02.2022, вторая рецензия получена 21.02.2022, принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 14.02.2022, first review received 17.02.2022, second review received 21.02.2022, accepted for publication 28.02.2022.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том I. Грузовые вагоны / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. — М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. — 456 с.

Рассмотрены базовые аспекты, связанные с созданием и эксплуатацией грузовых вагонов. Приведены общие соображения, касающиеся способов повышения провозной способности железных дорог, производительности перевозочного процесса. Представлен пример обзора конструкций грузовых вагонов. Даны методические основы анализа и испытаний, проводимых с целью выяснения эксплуатационного ресурса по усталостной долговечности грузовых вагонов и их компонентов. Приведены экономические соображения, касающиеся применения затрат жизненного цикла для определения суммарной стоимости владения вагоном до конца срока службы. Кратко описаны современные методы компьютерного

моделирования усталостных проявлений в контактах качения и процедуры испытаний. Освещается передовой опыт контроля технического состояния, технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. Рассмотрены мероприятия технического обслуживания и ремонта и особенности нормативно-правового регулирования технической эксплуатации грузовых вагонов разных стран. Описаны средства мониторинга технического состояния грузовых вагонов и поездов непосредственно в процессе движения. Приведена информация о ряде полезных систем мониторинга.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами железнодорожного транспорта, и студентов, изучающих данные проблемы.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru