



Научная статья

УДК 621.337.41

EDN: IWEJTW

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-749-759

Выбор схемы питания управляемых преобразователей возбуждения тяговых электродвигателей электровозов однофазно-постоянного тока

Н.Л. Михальчук¹✉¹Дирекция тяги, филиал ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, Россия

Резюме. Целью исследований являлась разработка эффективного схемотехнического решения и алгоритмов автоматического управления электровозами однофазно-постоянного (переменного) тока по законам постоянства силы тяги и постоянства мощности без переключения электрическими аппаратами силовых электрических цепей. Для решения обозначенной задачи использовались методы математического моделирования электромагнитных, электромеханических и механических процессов в среде MatLab, Simulink, SimPowerSystems. При этом учитывались нелинейности кривой намагничивания, а также выполнялся отдельный учет влияния вихревых токов от обмоток главных и добавочных полюсов тяговых электродвигателей. При моделировании применялся структурный и параметрический синтез силовой электрической схемы и алгоритмов управления с применением управляемых мостовых IGBT-преобразователей. Объектом исследования являлся электротехнический комплекс – трехсекционный электровоз типа ЗЭС5К «Ермак» мощностью 9840 кВт. По результатам проведенных исследований, в качестве технического решения предложено на исследуемом электровозе применить силовую электрическую схему с двумя выпрямительно-инверторными преобразователями на каждую из трех секций. Данные преобразователи обеспечивают питание четырех тяговых электродвигателей мощностью 820 кВт и схему группового питания управляемых мостовых IGBT-преобразователей, шунтирующих обмотки возбуждения для поосного управления силой тяги. Таким образом, выполненные расчеты подтвердили возможность реализации схемы индивидуального управления токами тяговых электрических двигателей и токами возбуждения, обеспечивая плавное нарастание силы тяги электровоза. Разработанный алгоритм поосного управления силой тяги обеспечивает плавное увеличение этой силы и создает лучшие условия для сцепления колес электровоза с рельсами. Данные решения могут быть использованы при изготовлении новых и модернизации эксплуатируемых электровозов.

Ключевые слова: электропривод электровозов однофазно постоянного тока, управляемый полупроводниковый транзисторный преобразователь возбуждения, групповая схема питания, независимое возбуждение коллекторных тяговых электродвигателей

Для цитирования: Михальчук Н.Л. Выбор схемы питания управляемых преобразователей возбуждения тяговых электродвигателей электровозов однофазно-постоянного тока // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 749–759. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-749-759>. EDN: IWEJTW.

POWER ENGINEERING

Original article

Selection of power supply scheme for controlled excitation converters in traction electric motors of single-phase DC electric locomotives

Nikolay L. Mikhalechuk¹✉¹Joint Stock Company “Russian Railways” (JSCo “RZD”), Moscow, Russia

Abstract. The article focuses on the development of an effective design and algorithms for automatic control of single-phase DC electric locomotives according to the laws of constant traction force and power without switching electrical devices within power electric circuits. Methods of mathematical modelling for electromagnetic, electromechanical, and mechanical processes by MatLab, Simulink, and SimPowerSystems software were used to address this problem. The nonlinearities of the magnetisation curve were taken into account, along with the influence of eddy currents from the

coils of the main and additional poles in traction motors. Structural and parametric synthesis of a power electrical circuit and control algorithms by controlled bridge IGBT converters were used in the simulation. The object of the research was an electrotechnical complex, including a 9840 kW three-stack electric locomotive 3ES5K "Ermak". On the basis of the research results, it is recommended to use a power electrical circuit with two reversible converters for each of the three sections on the electric locomotive. These converters provide power to four 820 kW traction motors and a group power supply for controlled bridge IGBT converters shunting the field coils for axial traction control. The calculations confirmed the applicability of a scheme for individual control of traction electric motors and excitation currents, ensuring a smooth increase in the traction force of an electric locomotive. The developed algorithm of axial traction control ensures a smooth increase in this force and creates the optimal conditions for coupling the wheels of an electric locomotive with rails. These solutions can be used in the manufacture and modernisation of new and existing electric locomotives.

Keywords: electric drive of single-phase direct current electric locomotives, controlled semiconductor transistor excitation converter, batch power supply circuit, separately excited commutator traction motors

For citation: Mikhailchuk N.L. Selection of power supply scheme for controlled excitation converters in traction electric motors of single-phase DC electric locomotives. *IPolytech Journal*. 2023;27(4):749-759 (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-749-759>. EDN: IWEJTW.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с прогнозируемым ростом грузооборота на железных дорогах России предусмотрено развитие Восточного полигона с увеличением пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т в год, что в 1,5 раза выше существующих объемов перевозок^{2,3}.

Для реализации поставленных задач необходимо обеспечить тяжеловесное движение локомотивами на полигонах обращения, способных по своим характеристикам перевозить поезда массой 7100–8000 т и более, с улучшенными тяговыми и энергетическими характеристиками.

Необходим поиск новых технических решений для совершенствования и повышения эффективности электровозов, разработка алгоритмов эффективного автоматического управления электроприводом. В связи с этим на железных дорогах мира выполняются работы по повышению мощности локомотивов за счет увеличения мощности тяговых электродвигателей (ТЭД), количества тяговых осей, повышения сцепного веса локомотивов и т.д. [1, 2].

Появление на рынке новых силовых полупроводниковых приборов (СПП) позволило реализовать новые схемотехнические решения и создавать экономичные и безот-

казные виды силовых, полупроводниковых преобразователей, повышающих тяговые [3] и сцепные свойства локомотивов, а также обеспечивающие повышение их энергоэффективности [4–6].

АНАЛИЗ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из направлений совершенствования тяговых свойств локомотивов для повышения весовых норм поездов и увеличения пропускных и провозных способностей железнодорожной сети является применение независимого возбуждения коллекторных ТЭД. Эффективность независимого возбуждения объясняется высокой жесткостью тяговых характеристик, что обеспечивает повышение противобуксовочных свойств локомотива при прохождении колесной парой элементов пути с плохими условиями сцепления колесных пар с рельсами⁴ [7, 8]. В нашей стране и за рубежом созданы электровозы с алгоритмами управления силовыми полупроводниковыми преобразователями, которые позволяют реализовать режимы независимого и последовательного возбуждения ТЭД [9].

Новочеркасским локомотивостроительным заводом, входящим в состав группы транспортного машиностроения «Трансмашхолдинг», выпускаются электровозы серии «Ермак»⁵ [10] однофазно-постоянного тока в двух (2ЭС5К), трехсекционном (ЗЭС5К) и четырехсекцион-

²О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474.

³Распоряжение Правительства Российской Федерации, Паспорт инвестиционного проекта "Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)" от 28 апреля 2021 года №1100-р. <http://government.ru/docs/42120/>

⁴Авт. св-во № 393138, СССР, В60L 9/12. Электрический привод локомотива / А.Т. Головатый, Л.Я. Финкельштейн, Н.Л. Шамраев [и др.]. Заявл. 10.06.1971; опубл. 07.07.1984. Бюл. № 25.

⁵Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ

(ЗТС.001.012РЭ). Новочеркасский электровозостроительный завод. Новочеркасск, 2007. Т. 1. 635 с.; Т. 2. 640 с.

ном (4ЭС5К) исполнениях, каждая секция которых оборудована токоприемником ХА1, (ХА2 – токоприемник второй секции), разъединителем QS1, главным выключателем QF1, фильтром помехоподавления Z1, тяговым трансформатором Т5 с выводами А и Х для его подключения через проходные изоляторы первичной обмотки трансформатора (рис. 1), тиристорными выпрямительно-инверторными устройствами (ВИУ1 и ВИУ2), подключенных ко вторичным обмоткам трансформатора Т5 $a_1 - 1 - 2 - x_1$, $a_2 - 3 - 4 - x_2$, к которым в свою очередь подключены через сглаживающие реакторы (СР) по два коллекторных тяговых электродвигателя (М) НБ514Е с номинальной часовой мощностью 820 кВт и с классом изоляции Н через сглаживающие реакторы (СР). Тормозной переключатель (ПТ) обеспечивает переключение силовой электрической схемы в режим электрического торможения. При переключении и сборе схемы рекуперативного торможения подключаются r_{CT} – блоки балластных резисторов, которые обеспечивают выравнивание токов якорей ТЭД в этом режиме, при этом все обмотки возбуждения включаются последовательно.

Электропоезд оборудован пультом управления машиниста (ПУМ) и микропроцессорной системой управления и диагностики (МПСУ). В режиме независимого возбуждения обмотки возбуждения (ОВ) отключаются от якорей (М) ТЭД, соединяются последовательно и подключаются к источнику питания. В качестве такого

источника используют двухполупериодный тиристорный управляемый выпрямитель с нулевым выводом 5 (ВУВ), подключенный к вторичным обмоткам трансформатора $a_3 - 5$, $5 - x_3$. К каждой обмотке возбуждения параллельно подключен шунтирующий резистор r_w и шунтирующий тиристор VSO. Реализация потележного или поосного автоматического управления электровозом в режиме независимого или последовательного возбуждения ТЭД производится в зависимости от изменения скорости движения v_i . Пульт управления машиниста передает сигнал задаваемой скорости движения - v_3 в МПСУ для сравнения с фактической скоростью - v_i , и последующим формированием сигналов управления угла открытия тиристорных плеч α_{pi} ВИУ1 и ВИУ2, формированием сигналов управления α_b тиристорных плеч ВУВ при независимом возбуждении ТЭД в тяговом режиме и режиме рекуперации и сигналы управления α_{oi} для шунтирующих тириستоров обмотки возбуждения VSO. Для формирования сигналов управления микропроцессорной системой по каналам обратной связи на вход МПСУ поступает информация о величине токов на обмотках возбуждения ТЭД I_b и о значении токов двигателей $I_{яi}$.

Схемотехнические решения электропривода с независимым возбуждением и поосным управлением силой тяги позволяют эффективно реализовывать режимы трогания и разгона поезда, а также работу на участках с критическими подъемами, то есть в наиболее

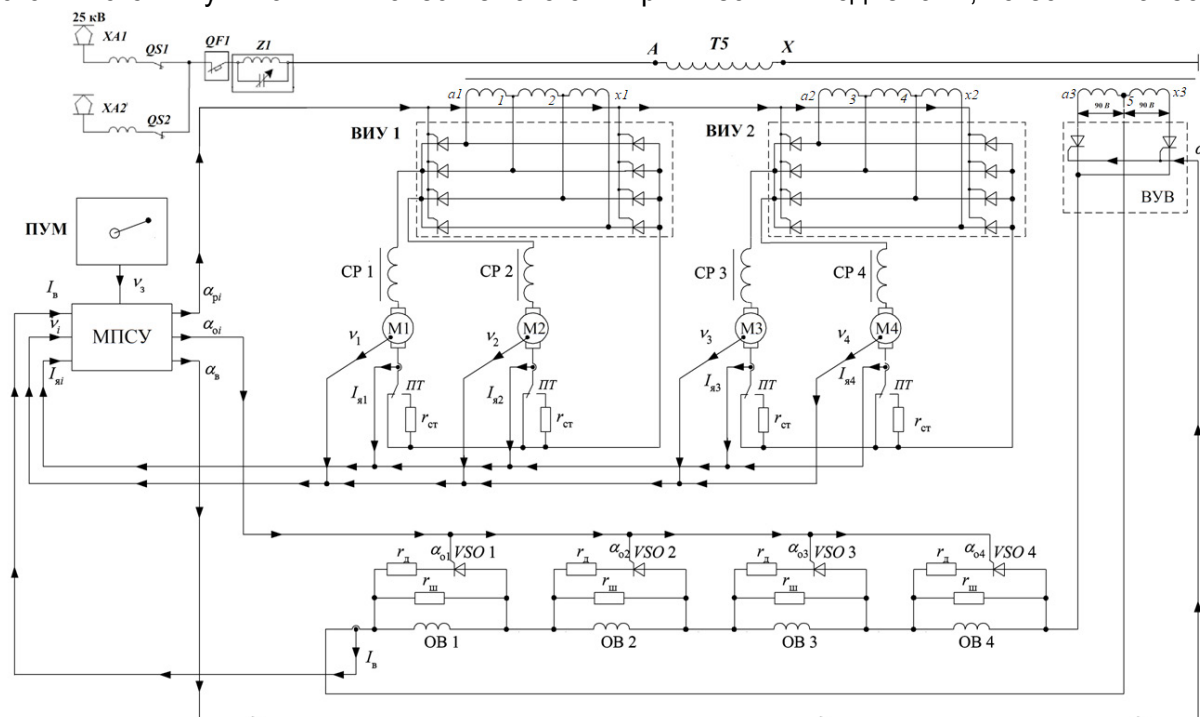


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей одной секции эксплуатируемого электровоза «Ермак» 2 (3, 4) ЭС5К
Fig. 1. Simplified scheme of one section power circuits of the operated electric locomotive "Ermaк" 2 (3, 4) ES5K

тяжелых режимах эксплуатации тягового электропривода. На равнинных участках и на спусках при высоких скоростях движения происходит переключение на последовательное возбуждение ТЭД.

В настоящее время в России и в мире для реализации тяжеловесного движения поездов применяют также тяговый электропривод электровозов с асинхронным ТЭД [11]. Выполненное в нашей работе [12] сравнение тяговых характеристик асинхронного ТЭД с коллекторным двигателем, работающим в режимах независимого или последовательного возбуждения, показало, что в режимах трогания и разгона преимущество имеют электровозы с коллекторными ТЭД в режиме независимого возбуждения и их следует применять на грузо-

вых электровозах в тяжеловесном движении. Вместе с тем в режимах движения на высоких скоростях преимущество имеют электровозы с асинхронными ТЭД, а поэтому их применение приоритетно в пассажирском движении и для выполнения контейнерных перевозок [13, 14].

Для исследования работоспособности и качества функционирования электровозов «Ермак» независимым возбуждением ТЭД были проведены тягово-энергетические испытания с тяжеловесными поездами 7100 т на участке Тайшет – Иркутск Восточно-Сибирской железной дороги. Проведенные исследования выявили ряд существенных недостатков этих электровозов в реализованных схмотехнических решениях и алгоритмах работы силовой электрической цепи [15].

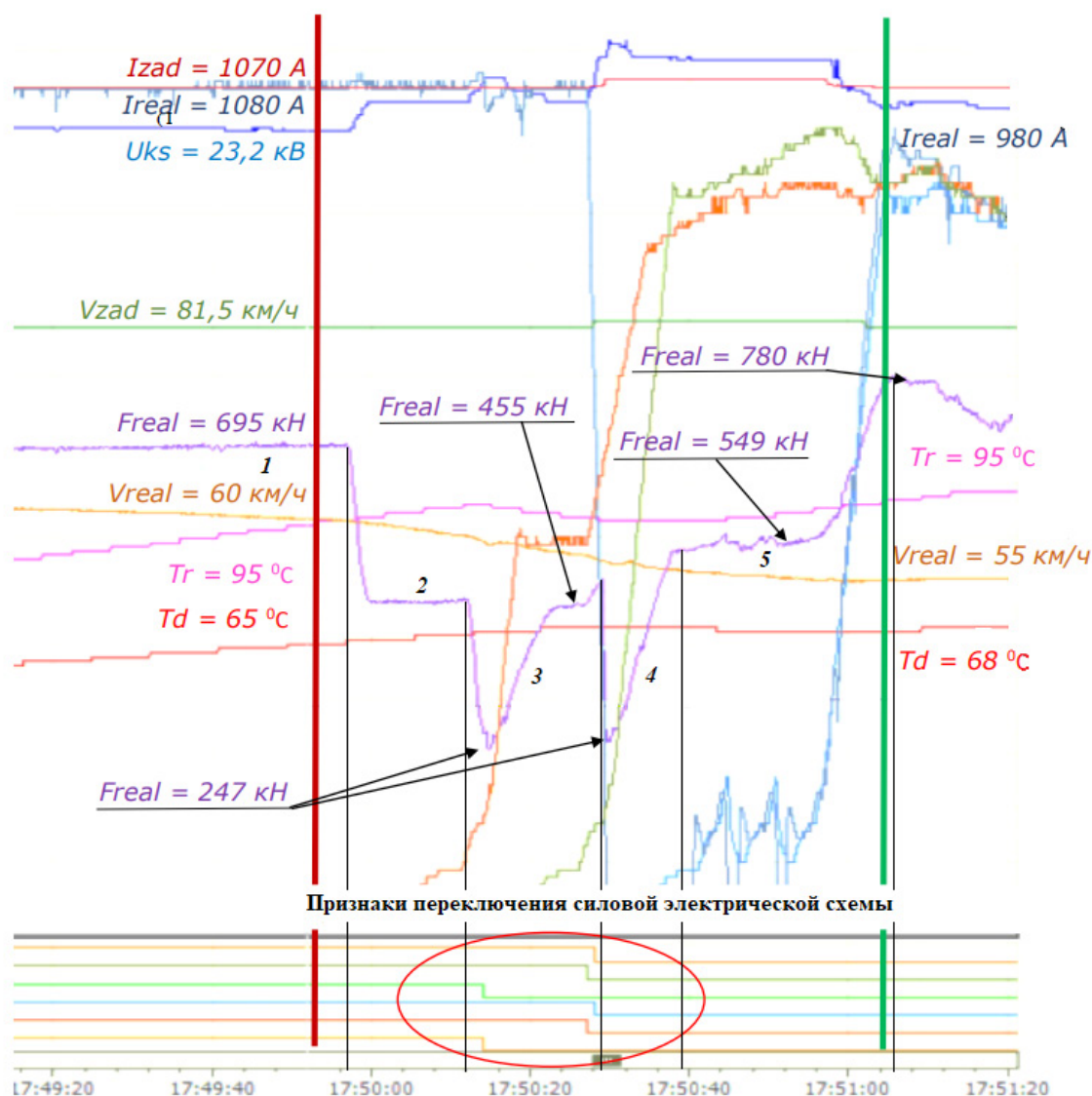


Рис. 2. Регистрация параметров движения поезда микропроцессорной системой управления и диагностики головной секции электровоза

Fig. 2. Recording of train movement parameters by the microprocessor control and diagnostic system of the electric locomotive head section

Расшифрованные результаты измерений, выполненные бортовыми системами диагностики, входящими в состав МПСУ (рис. 2), показали следующее. При движении электровоза с тяжеловесным составом на критический подъем происходит снижение скорости (параметр V_{real}) ниже 60 км/ч. При этом начинается процесс переключения на независимое возбуждение ТЭД отдельных секций электровоза, сопровождающийся разрывом силовой цепи.

Вначале на независимое возбуждение переводится третья секция, что вызывает снижение силы тяги электровоза с величины 695 кН (параметр F_{real} на рис. 2) до величины 455 кН – режим, обозначенный как «1». Далее отключается вторая секция со снижением силы тяги до 247 кН (режим 2). После этого происходит включение на независимое возбуждение третьей секции, что сопровождается увеличением силы тяги до 455 кН (режим 3). Затем отключается первая секция электровоза со снижением силы тяги повторно до 247 кН.

Далее, включается вторая секция и происходит увеличение силы тяги до 549 кН (режим 4), а потом включается первая секция и сила тяги увеличивается с 549 кН до 780 кН. Все эти переключения происходят в течение 60 с (по 15 с для каждого режима) и сопровождаются снижением скорости (параметр V_{real}) до 55 км/ч при движении поезда на критический подъем с увеличением тягового тока и ростом температуры силового предельно нагруженного электрооборудования обозначена на рис. 2 температура нагрева сглаживающих реакторов T_r и тяговых двигателей T_d соответственно, измеряемая в градусах, °С. Такие изменения силы тяги вызывают появление толчков и рывков в составе поезда, увеличивая риск

превышения допустимых сил в автосцепках и, как следствие, их разрушение и обрыв. Кроме этого, микропроцессорной системой управления учитываются (рис. 2) и фиксируются параметры: U_{ks} – напряжение в контактной сети, кВ; I_{real} – среднее значение тока тяговых двигателей, А. Заданные системой управления предельные значения скорости V_{zad} , км/ч; и среднего значения тока тяговых двигателей I_{zad} , А.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

По результатам выявленных недостатков силовой электрической схемы и проведенных исследований электровозов серии «Ермак» проведена разработка, структурный и параметрический синтез новой силовой электрической схемы этого электровоза [16–18] на основе замены тиристорных управляемых выпрямителей возбуждения ВУВ, на индивидуальные управляемые транзисторные мостовые преобразователи возбуждения (УПВ).

Для питания этих преобразователей была предусмотрена индивидуальная схема с подключением каждого из них к отдельным вторичным обмоткам трансформатора через диодные выпрямители (ДВ1-4) с L – C фильтрами (рис. 3). Такая индивидуальная схема питания обеспечивает гальваническую развязку УПВ, а ее применение позволило разработать принципы управления этими преобразователями [19]. Вместе с тем схема индивидуального управления значительно усложняет конструкцию тягового трансформатора, так как требует замены вторичных обмоток трансформатора $a_3 - 5, 5 - x_3$ (см. рис. 1) на четыре одновитковых обмотки $a_{31} - x_{31}, a_{32} - x_{32}, a_{33} - x_{33}$ и $a_{34} - x_{34}$ (рис. 3).

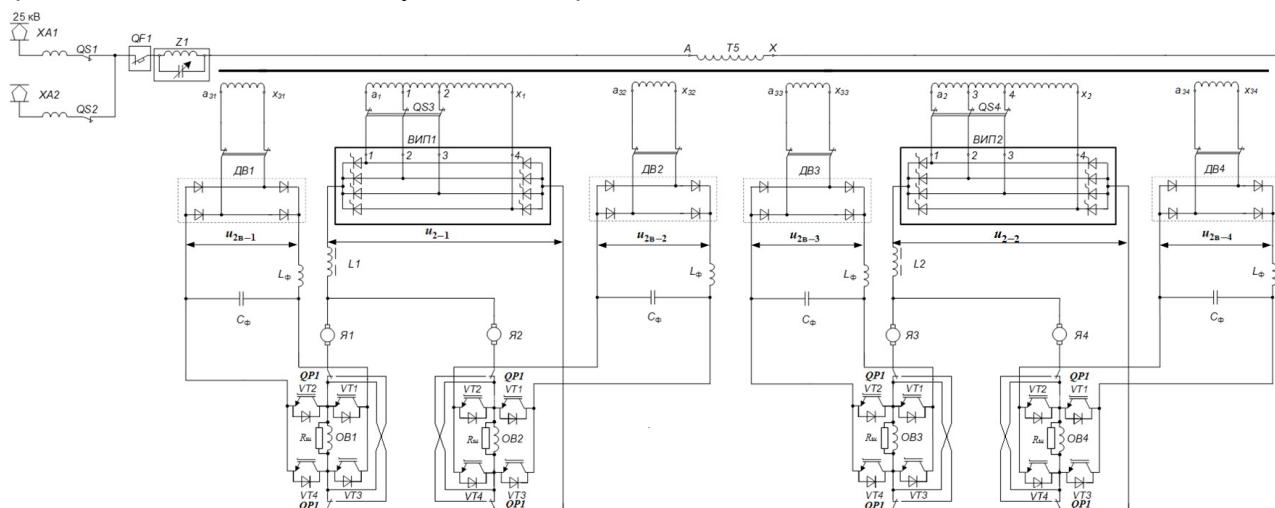


Рис. 3. Упрощенная схема силовых цепей одной секции электровоза с управляемыми преобразователями возбуждения
Fig. 3. Simplified scheme of one section power circuits of an electric locomotive with controlled excitation converters

Для оценки возможности упрощения конструкции трансформатора на основе применения групповой схемы питания УПВ1–4 от одной обмотки трансформатора a_3-x_3 через один диодный выпрямитель были выполнены сравнительные расчеты токов ТЭД $I_{дi}(t)$ и токов возбуждения ТЭД $I_{вi}(t)$ для индивидуальной и групповой схем питания УПВ. При этом было принято, что на второй секции электровоза реализована индивидуальная схема питания УПВ, а на третьей секции – групповая.

Заданные значения токов возбуждения $I_{в3i}^H$ для режима независимого возбуждения ТЭД могут быть получены на основе реализации режима подпитки ОВ путем открытия транзисторов VT1, VT4 каждого преобразователя УПВ1-4 (см. рис. 3) в момент времени $t = 0$ с. При этом появляются токи подпитки $I_{п3i}$, создающие магнитные потоки Φ_i , необходимые для обеспечения нормальной работы ТЭД при последующем включении выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), создающих токи двигателей $i_{дi}$.

$$I_{п3i} = I_{в3i}^H - i_{дi}. \quad (1)$$

Таким образом, токи $I_{п3i}$ будут уменьшаться по мере роста $i_{дi}$ и достигнут установившихся значений. С помощью этих токов реализуются три различные тяговые характеристики независимого возбуждения: **Т30** – усиленная характеристика для режима $I_{в3i}^H = 1000$ А (табл. 1); **Т1** – часовая усиленная характеристика с током $I_{в3i}^H = 870$ А и

ТД – характеристика длительного режима работы $I_{в3i}^H = 810$ А.

Таблица 1. Заданные значения сил тяги и токов электровоза, соответствующие характеристикам независимого возбуждения тяговых электродвигателей
Table 1. Set values of traction forces and electric locomotive currents corresponding to the characteristics of the separate excitation of traction electric motors

Параметры	Тяговые характеристики		
	Т30	Т1	ТД
$F_{кз}, кН$	839	696,2	635,7
$I_{д3i}^H, А$	1000	870	810

Для получения характеристики последовательного возбуждения с уменьшенным (ослабленным) током $I_{в3i}^{пм1}$ предложено выполнить режим отпитки обмоток возбуждения ТЭД током $I_{о3}$ путем открытия транзисторов VT2, VT3 каждого УПВ1-4 с запаздыванием по отношению к появлению тока $i_{дi}$:

$$I_{о3} = i_{дi} - I_{в3i}^{пм1} = i_{дi} - \beta i_{дi} = (1 - \beta) i_{дi}, \quad (2)$$

где β – коэффициент уменьшения тока возбуждения $\beta = 0,45$. Тогда ток отпитки будет равен: $I_{о3} = 0,55 i_{дi}$.

В математической модели, на основе которой были выполнены расчеты токов $i_{дi}(t)$ и $I_{вi}(t)$, учитывалась нелинейность кривой намагничивания, а также выполнялось индивидуальное определение вихревых токов, вызываемых обмотками возбуждения и обмотками дополнительных полюсов ТЭД [20, 21]. Система уравнений, описывающих процессы изменения токов $I_{дi}(t)$ и $I_{вi}(t)$ с учетом этих особенностей, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_e v \Phi + r_{я+дп} i_{дi} + \frac{d\psi_{я+дп}}{dt} + r_{вi} i_{вi} + \frac{d\psi_{вi}}{dt} = u_{дi} \\ i_{вi} = i_{дi} \pm i_{доп} \\ \frac{d\psi_{вi}}{dt} + r_{вi} i_{доп} = u_{вн} \\ 1,23 r_{\mu 1} \Phi_1 + i_{\mu в} w_{вi} - r_{\mu 1} \Phi + L_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} = i_{вi} w_{вi} = F_{вi} \\ 5,29 r_{\mu 1} (\Phi - \Phi_1) + i_{\mu в} w_{вi} - r_{\mu 1} \Phi + 0,475 L_{\mu} \frac{d}{dt} (\Phi - \Phi_1) = F_{вi} \\ 1,23 r_{\mu 1д} \Phi_{1мд} + i_{\mu д} w_{дi} - r_{\mu 1д} \Phi_{мд} + L_{\mu д} \frac{d\Phi_{1мд}}{dt} = i_{яi} w_{дi} = F_{дi} \\ 5,29 r_{\mu 1д} (\Phi_{мд} - \Phi_{1мд}) + i_{\mu д} w_{дi} - r_{\mu 1д} \Phi_{мд} + 0,475 L_{\mu д} \frac{d}{dt} (\Phi_{мд} - \Phi_{1мд}) = F_{дi} \end{array} \right. \quad (3)$$

В этих уравнениях обозначено:

u_d – напряжение, прикладываемое от выпрямительно-инверторных преобразователей к ТЭД, В;

u_{BH} – напряжение возбуждения, прикладываемое от УПВ к обмоткам возбуждения ТЭД, В;

$r_{я+дп}$ – сопротивления якоря и обмотки добавочных полюсов ТЭД, Ом;

L_μ – индуктивность основного потока, Гн;

$L_{\mu d} = L_\mu + L_{дп}$ – индуктивность основного

потока, Гн;

r_B – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$\Psi_B, \Psi_{я+дп}$ – потокосцепления обмотки возбуждения, а также якоря с добавочными полюсами, Вб;

$i_{доп}$ – токи подпитки или отпитки, создаваемые УПВ, А;

$1,23r_{\mu 1}, 5,29r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление основному потоку и магнитное сопротивление потоку высших гармоник, Гн⁻¹;

$1,23r_{\mu 1}, 5,29r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление потоку первой гармоники добавочных полюсов и магнитное сопротивление потоку высших гармоник добавочных полюсов, Гн⁻¹;

L_μ и $L_{\mu d}$ – индуктивность основного потока и индуктивность основного потока добавочных полюсов, Гн;

Φ и Φ_1 – полный магнитный поток ТЭД и магнитный поток первой гармоники, Вб;

ω_d и ω_B – число витков якоря, добавочных полюсов и обмотки возбуждения;

$i_{\mu d}$ – намагничивающий ток добавочных полюсов, А;

$\Phi_{мд}$ и $\Phi_{1мд}$ – полный магнитный поток добавочных полюсов и магнитный поток первой гармоники добавочных полюсов, Вб;

F_d и F_B – МДС добавочных полюсов и МДС обмотки возбуждения, А.

Рассмотрим результаты расчетов переходных процессов двигателей и возбуждения для второй и третьей секций электровоза при следующих режимах работы:

– трогание и разгон до выхода на заданное значение силы тяги 839 кН, которое соответствует току ТЭД 1000 А (см. табл. 1);

– снижение заданного значения силы тяги на ~25%, т. е. с 839 кН до 635,7 кН в момент времени 20 с, что соответствует переходу с характеристики **T30** на **T1**;

– восстановление заданного значения силы тяги в момент времени 30 с.

При этом в качестве токов возбуждения и двигателей будем рассматривать их установившиеся значения I_{Bi}^H и $I_{дi}^H$.

Результаты этих расчетов для второй секции электровоза с индивидуальной системой питания УПВ и третьей секции с групповой схемой питания (см. рис. 3) показывают следующее. В момент трогания включаются преобразователи УПВ, появляются токи подпитки, а токи возбуждения $I_{Bi}(t)$ достигают установившихся значений, приведенных в табл. 2 для характеристики **T30**, к моменту времени 2–2,5 с (рис. 4 а).

Таблица 2. Заданные значения токов возбуждения и двигателя тяговых электродвигателей для тяговых характеристик **T30** и **T1**

Table 2. Set values of excitation currents and traction motor for traction characteristics **T30** and **T1**

Вид характеристики	№ ТЭД	I_{Bi}, A	$I_{дi}, A$
T30	ТЭД1	849	895
	ТЭД2	850	945
	ТЭД3	910	1027
	ТЭД4	950	1065
T1	ТЭД1	787	800
	ТЭД2	800	840
	ТЭД3	868	900
	ТЭД4	900	943

Токи ТЭД $I_{дi}^H(t)$ изменяются по-другому (рис. 4 б) в соответствии с принципами управления, рассмотренными в [19]. Вначале включаются ТЭД № 11 и 12 на третьей секции в момент времени $t = 5$ с. Такое запаздывание необходимо для того, чтобы токи возбуждения этих ТЭД гарантированно достигли своих установившихся значений, и включение ТЭД происходило при независимом их возбуждении, создаваемом преобразователями УПВ. Затем, когда токи $I_{д11}^H(t)$ и $I_{д12}^H(t)$ в момент времени ~6 с достигнут ~90% от своих установившихся значений, приведенных в табл. 2, включаются в работу ТЭД № 7 и 8 на второй секции.

ТЭД № 9 и 10 будут включаться в работу после того, как включатся ТЭД № 3 и 4 второй секции и достигнут ~90% от своих установившихся значений, приведенных в табл. 2, т. е. в момент времени ~10 с. После того, как токи ТЭД № 9 и 10 также достигнут ~90%, в работу включатся ТЭД № 5 и 6, т. е. в момент времени ~12 с.

В момент времени $t = 20$ с происходит второй переход с характеристики **T30** на характеристику **T1** (часовой режим). При этом токи $I_{дi}^H(t)$ снижаются до новых установившихся значений с некоторым перерегулированием, не превышающим 5%.

В момент времени $t = 30$ с происходит

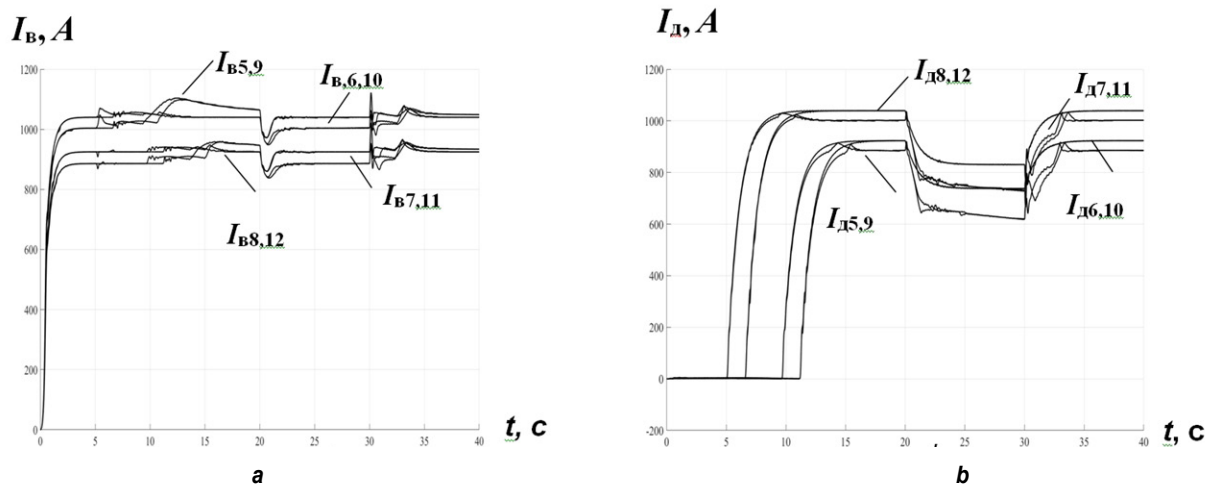


Рис. 4. Графики изменения тока возбуждения (а) и токов тяговых электродвигателей (б)
Fig. 4. Variance curves of the excitation current (a) and traction motor currents (b)

третий переход с характеристики **T1** на характеристику **T30**, и токи ТЭД начинают возрастать до установившихся значений, соответствующих этой характеристике – см. табл. 2. При этом в графиках токов $I_{Bi}^H(t)$ и $I_{di}^H(t)$ наблюдаются более высокие амплитуды высокочастотных составляющих, чем при первом и втором переходах. Однако величина амплитуды не превышает 10%, что допустимо.

Графики изменения токов $I_{d5}(t)$, $I_{d6}(t)$, $I_{d7}(t)$ и $I_{d8}(t)$ второй секции, на которой реализована схема индивидуального питания УПВ, практически не отличаются от графиков токов $I_{d9}(t)$, $I_{d10}(t)$, $I_{d11}(t)$ и $I_{d12}(t)$ третьей секции с групповым питанием УПВ. Таким образом, влияние гальванической развязки мало и можно в дальнейшем использовать силовую электрическую схему электровоза с групповым питанием УПВ.

Графики изменения сил тяги $F_{ki}(t)$ отдельных ТЭД (рис. 5 а) повторяют графики изме-

нения токов $I_{di}^H(t)$ ТЭД. Амплитуды высокочастотных составляющих сил тяги, возникающие в групповой схеме питания при переходах с одной тяговой характеристики на другую, также не превышают допустимых 10%. Кроме того, графики $F_{ki}(t)$ для индивидуальной и групповой схем питания также практически не отличаются друг от друга. График (рис. 5 б) показывает, что суммарная сила тяги электровоза нарастает плавно, обеспечивая минимизацию продольных динамических сил в поезде.

Таким образом, выполненные исследования показали, что применение схемы группового питания УПВ не вызывает значительных изменений в графиках токов двигателей ТЭД $I_{di}(t)$, а также сил тяги $F_{ki}(t)$, вызванных появлением гальванической связи. Поэтому систему группового питания можно использовать в предложенной силовой схеме электровоза (см. рис. 3).

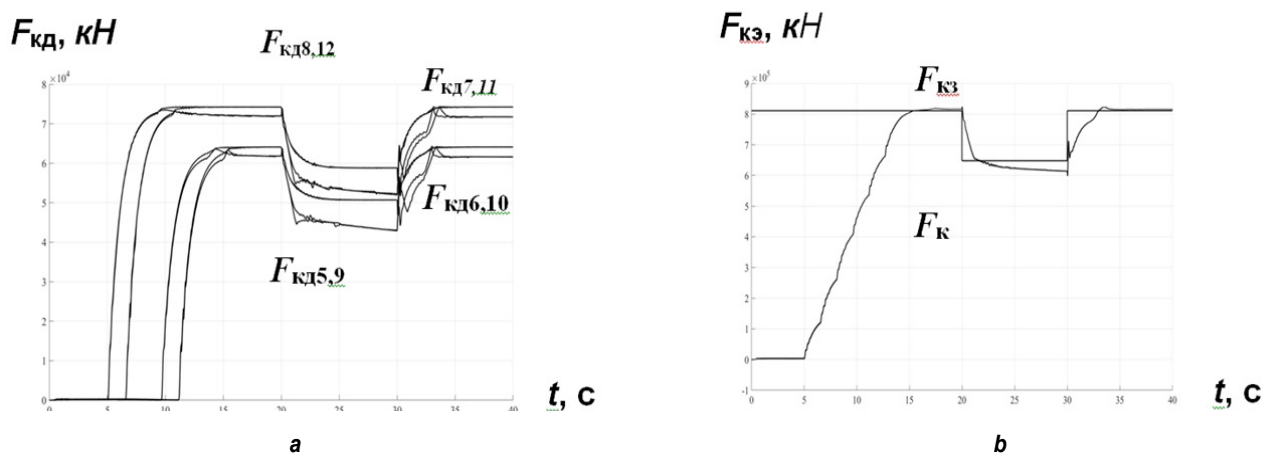


Рис. 5. Графики изменения сил тяги отдельных тяговых электродвигателей (а) и силы тяги электровоза (б)
Fig. 5. Variance curves of the traction forces of individual traction motors (a) and the traction force of an electric locomotive (b)

В схеме с групповым питанием необходимо будет заменить обмотки трансформатора: $a_3 - 5, 5 - x_3$ (см. рис. 3) на одну одновитковую обмотку $a_3 - x_3$ напряжением 45 В с двумя выводами. Сечение этой обмотки и выводов должно быть рассчитано на ток 4000 А для питания четырех УПВ. Таким образом, мощность, потребляемая от обмотки $a_3 - x_3$, составит 180 кВт. При этом также нужно учесть, что токи подпитки $I_{\Pi_i}(t) = 1000$ А, создаваемые преобразователями УПВ, потребляются кратковременно в течение ~15 с [19] только до появления токов ТЭД $I_{д_i}(t)$, а после того, как появятся эти токи $I_{д_i}(t)$, токи возбуждения $I_{в_i}(t)$ станут равны:

$$I_{в_i}(t) = I_{\Pi_i}(t) - I_{д_i}(t). \quad (4)$$

Таким образом, перегрузки по мощности

трансформатора электровоза при работе УПВ не произойдет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В предлагаемой силовой схеме электровоза возможно применение групповой схемы питания управляемых преобразователей возбуждения, так при этом практически отсутствует влияние гальванической связи между параллельно включаемыми преобразователями на характер изменения во времени токов и сил тяги тяговых электродвигателей.

2. Реализация разработанных ранее принципов управления преобразователями при групповой схеме их питания обеспечивает возможность плавного увеличения силы тяги электровоза при трогании и разгоне поезда.

Список источников

1. Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Yan Quan, McSweeney T. Design and simulation of heavy haul locomotives and trains // Engineering & Technology. Boca Raton: CRC Press, 2016. 477 p. <https://doi.org/10.1201/9781315369792>. EDN: YBLZZJ.
2. Stolchnev A. World's most powerful electric locomotive Shen24 by CRRC for coal cargo service in China24 // TMH [Электронный ресурс]. URL: <https://rollingstockworld.com/locomotives/worlds-most-powerful-electric-locomotive-shen24-by-crrc-for-coal-cargo-service-in-china> (28.06.2023).
3. Fornander P. Refurbishment of class 11E locomotives for Spoonnet // Proceedings of the International Heavy Haul Association Specialist Technical Session: High Tech in Heavy Haul (Kiruna, 11–13 June 2007). Kiruna: Sweden, 2007. P. 203–212.
4. Ishrat T., Ledwich G., Vilathgamuwa M., Borghesani P. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives // Australasian Universities Power Engineering Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749331>.
5. Михальчук Н.Л., Курилкин Д.Н., Урушев С.В., Макарова Е.И. Энергетическая эффективность полупроводниковых преобразователей локомотивов // Электротехника. 2018. № 10. С. 15–20. <https://doi.org/10.3103/S1068371218100073>. EDN: YAMGNV.
6. Михальчук Н.Л., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Электромагнитные процессы в силовой схеме электровоза с управляемым преобразователем возбуждения // Электротехника. 2022. № 9. С. 34–42. https://doi.org/10.53891/00135860_2022_9_34. EDN: DZQWTP.
7. Головатый А.Т., Исаев И.П., Горчаков Е.В. Независимое возбуждение тяговых двигателей электровозов. М.: Транспорт, 1976. 152 с.
8. Михальчук Н.Л., Назаров Н.С., Капустин М.Ю. Система автоматического управления тяговым приводом с адаптивным возбуждением электродвигателей // Наука и техника транспорта. 2017. № 1. С. 14–20. EDN: YHWPIN.
9. Tornerud G. Austrian railways place Swedish thyristor locomotives in service // Rail Engineering International. 1972. Iss. 5. P. 84.
10. Задорожный В.Л. Особенности электровозов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги // Локомотив. 2019. № 10. С. 11–16. EDN: MZSKFP.
11. Бенькович Н.И., Михальчук Н.Л., Ролле И.А., Агунов А.В., Марикин А.Н. Прямое цифровое управление токами асинхронных тяговых электродвигателей // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 6. С. 43–47. EDN: HXWEWA.
12. Михальчук Н.Л., Пудовиков О.Е., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Электровоз с плавным управлением в режимах независимого и последовательного возбуждения тяговых электродвигателей // Железнодорожный транспорт. 2022. № 9. С. 35–39. EDN: CQGNZV.
13. Tian Ye, Liu Sheng, Daniel W.J.T., Meehan P.A. Investigation of the impact of locomotive creep control on wear under changing contact conditions // Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53. Iss. 5. P. 692–709. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1020815>.
14. Liu Sheng, Tian Ye, Daniel W.J.T. (Bill), Meehan P.A. Modelling of track wear damage due to changes in friction conditions: a comparison between AC and DC electric drive locomotives // Wear. 2016. Vol. 366–367. P. 338–345.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.023>.

15. Михальчук Н.Л., Попов Ю.И., Савоськин А.Н., Пудовиков О.Е., Чучин А.А. Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемыми преобразователями возбуждения тяговых двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 2. С. 104–114. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-104-114>. EDN: DTQYEO.
16. Михальчук Н.Л., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Силовая схема электровоза переменного тока с применением управляемого транзисторного преобразователя возбуждения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 3. С. 18–22. EDN: SOUMML.
17. Пат. № 2788223, Российская Федерация, С1 В60L 9/02, В60L 9/12, H02P 7/28. Электрический привод электровоза / Ю.И. Попов, Н.Л. Михальчук, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков, А.А. Чучин; заявитель ОАО «Российские железные дороги». Заявл. 22.09.2022; опублик. 17.01.2023. Бюл. № 2. EDN: TSIIOX.
18. Пат. № 2787135, Российская Федерация, С1 G05F 1/10. Способ автоматического управления током тяговых электродвигателей подвижного состава / Ю.И. Попов, Н.Л. Михальчук, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков; заявитель ОАО «Российские железные дороги». Заявл. 29.03.2022; опублик. 29.12.2022. Бюл. № 1. EDN: RHJIUY.
19. Михальчук Н.Л., Пудовиков О.Е., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Принципы управления электровозом однофазного постоянного тока с управляемыми преобразователями возбуждения // Электротехника. 2023. № 9. С. 6–13. EDN: FIJGZR.
20. Евсеев В.Ю., Савоськин А.Н. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с отдельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов // Электротехника. 2020. № 9. С. 32–38. EDN: QCLNPM.
21. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть - электровоз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35. EDN: MPLOHF.

References

1. Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Yan Quan, McSweeney T. Design and simulation of heavy haul locomotives and trains. In: *Engineering & Technology*. Boca Raton: CRC Press; 2016, 477 p. <https://doi.org/10.1201/9781315369792>. EDN: YBLZZJ.
2. Stolchnev A. World's most powerful electric locomotive Shen24 by CRRC for coal cargo service in China24. *TMH* Available from: <https://rollingstockworld.com/locomotives/worlds-most-powerful-electric-locomotive-shen24-by-crrc-for-coal-cargo-service-in-china> [Accessed 28th June 2023].
3. Fornander P. Refurbishment of class 11E locomotives for Spoornet. In: *Proceedings of the International Heavy Haul Association Specialist Technical Session: High Tech in Heavy Haul*. 11–13 June 2007, Kiruna. Kiruna: Sweden; 2007, p. 203–212.
4. Ishrat T., Ledwich G., Vilathgamuwa M., Borghesani P. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749331>.
5. Mikhailchuk N.L., Kurilkin D.N., Urushev S.V., Makarova E.I. The energy efficiency of the semiconductor converters of engines or locomotives. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2018;10:15–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S1068371218100073>. EDN: YAMGNV.
6. Mikhailchuk N.L., Savoskin A.N., Chuchin A.A. Electromagnetic processes in the power circuit of an electric locomotive with a controlled excitation converter. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2022;9:34–42. (In Russ.). https://doi.org/10.53891/00135860_2022_9_34. EDN: DZQWTP.
7. Golovaty A.T., Isaev I.P., Gorchakov E.V. *Separate excitation of electric locomotive traction motors*. Moscow: Transport; 1976, 152 p. (In Russ.).
8. Mikhailchuk N.L., Nazarov N.S., Kapustin M.Yu. Automatic control system for traction drive with adaptive excitation of electric motors. *Nauka i tekhnika transporta = Science and Technology in Transport*. 2017;1:14–20. (In Russ.). (In Russ.). EDN: YHWPIN.
9. Tornerud G. Austrian railways place Swedish thyristor locomotives in service. *Rail Engineering International*. 1972;5:84.
10. Zadorozhnyj V.L. Features of the Ermak series electric locomotives with axle-by-axle traction control. *Lokomotiv*. 2019;10:11–16. (In Russ.). EDN: MZSKFP.
11. Benkovich N., Michalchuk N., Rolle I., Agunov A., Marikin A. Direct digital current control system of asynchronous traction motors. *Elektronika i elektroobrudovanie transporta*. 2019;6:43–47. EDN: HXWEWA.
12. Mikhailchuk N.L., Pudovikov O.E., Savoskin A.N., Chuchin A.A. Electric locomotive with stepless control in independent and sequential excitation modes of traction motors. *Zheleznodorozhnyj transport*. 2022;9:35–39. (In Russ.). EDN: CQGNZV.
13. Tian Ye, Liu Sheng, Daniel W.J.T., Meehan P.A. Investigation of the impact of locomotive creep control on wear under changing contact conditions. *Vehicle System Dynamics*. 2015;53(5):692–709. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1020815>.
14. Liu Sheng, Tian Ye, Daniel W.J.T. (Bill), Meehan P.A. Modelling of track wear damage due to changes in friction conditions: a comparison between AC and DC electric drive locomotives // *Wear*. 2016; 366–367: 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.023>.
15. Mikhailchuk N.L., Popov Yu.I., Savoskin A.N., Pudovikov O.E., Chuchin A.A. Improving the efficiency of the electric locomotive drive with a controllable converter for traction motor excitation. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij = Bulletin of Scientific Research Results*. 2023;2:104–114. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-104-114>. (In Russ.). EDN: DTQYEO.

16. Mikhalechuk N.L., Savoskin A.N., Chuchin A.A. Power circuit of an alternating current electric locomotive using a controlled transistor excitation converter. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2022;3:18-22. (In Russ.). EDN: SOUMML.
17. Popov Yu.I., Mikhalechuk N.L., Savoskin A.N., Pudovikov O.E., Chuchin A.A. *Electric drive of an electric locomotive*. Patent RF, no. 2788223; 2023. (In Russ.). EDN: TSIOX.
18. Popov Yu.I., Mikhalechuk N.L., Savoskin A.N., Pudovikov O.E. *Automatic control method of rolling stock traction motor current*. Patent RF, no. 2787135; 2022. (In Russ.). EDN: RHJIUY.
19. Mihal'chuk N.L., Pudovikov O.E., Savos'kin A.N., Chuchin A.A. Control principles of a single-phase direct current electric locomotive with controlled excitation converters. *Elektrotehnika*. 2023;9:6-13. (In Russ.). EDN: FIJGZR.
20. Evseev V.Yu., Savos'kin A.N. Mathematical model of a commutator traction motor with separate consideration of eddy currents of the main and additional poles. *Elektrotehnika*. 2020;9:32-38. (In Russ.). EDN: QCLNPM.
21. Savos'kin A.N., Kulinich Yu.M., Alekseev A.S. Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system "catenary system – electric locomotive". *Elektrichestvo*. 2002;2:29-35. (In Russ.). EDN: MPLOHF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михальчук Николай Львович,

к.т.н.,

Дирекция тяги, филиал ОАО «Российские
железные дороги»,

107174, г. Москва, Басманный тупик, 6а/4, Россия

✉ MihalchukNL@center.rzd.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikolay L. Mikhalechuk,

Cand. Sci. (Eng.)

Joint Stock Company "Russian Railways" (JSCo "RZD"),
Directorate of Locomotive Traction,

6a/4, Basmany tupik, Moscow, 107174, Russia

✉ MihalchukNL@center.rzd.ru

Вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу,
на основании полученных результатов провел
обобщение, подготовил рукопись к печати.

Contribution of the author

The author performed a comprehensive analysis, made
a generalization on the basis of the results obtained and
prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare no conflicts of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант
рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved
by author.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.08.2023 г.;
одобрена после рецензирования 07.10.2023 г.;
принята к публикации 12.10.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 29.08.2023;
approved after reviewing 07.10.2023;
accepted for publication 12.10.2023.