

УДК 621.337.41

## Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемым преобразователем возбуждения тяговых двигателей

Н. Л. Михальчук<sup>1</sup>, Ю. И. Попов<sup>2</sup>, А. Н. Савоськин<sup>3</sup>, О. Е. Пудовиков<sup>3</sup>, А. А. Чучин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Дирекция тяги — филиал ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 107174, Москва, Басманный тупик, ба/4

<sup>2</sup>Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства — филиал ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 105066, Москва, Ольховский пер., 205

<sup>3</sup>Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9/9

**Для цитирования:** Михальчук Н. Л., Попов Ю. И., Савоськин А. Н., Пудовиков О. Е., Чучин А. А. Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемым преобразователем возбуждения тяговых двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 104–114. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-104-114

### Аннотация

**Цель:** Выполнить обоснование схемотехнического решения и алгоритмов индивидуального плавного и автоматического управления электровозами однофазно постоянного тока по законам постоянства силы тяги и постоянства мощности без разрыва силовых электрических цепей электровоза для повышения эффективности его электропривода с управляемыми преобразователями возбуждения тяговых двигателей. В качестве схемотехнического решения предложено применить силовую электрическую схему с двумя выпрямительно-инверторными преобразователями на каждую секцию электровоза для потележечного управления силой тяги и индивидуальные управляемые мостовые транзисторные преобразователи, шунтирующие обмотки возбуждения, для поосного управления силой тяги в пределах каждой тележки. **Методы:** Разработки схемотехнических решений с применением современных силовых полупроводниковых преобразователей; теории автоматического управления и проектирования конечных автоматов; математического моделирования электромагнитных, электромеханических и механических процессов. **Результаты:** Разработанные алгоритмы управления обеспечивают возможность получения тяговых характеристик электровоза, изменяющихся по законам постоянства силы тяги или постоянства мощности, приближающих тяговые характеристики электровозов с коллекторными тяговыми электродвигателями к характеристикам электровозов с асинхронными тяговыми электродвигателями. Выполненные расчеты подтвердили возможность реализации алгоритмом индивидуального управления токами тяговых двигателей и токами их возбуждения, а также силами тяги, что обеспечивает плавное нарастание силы тяги электровоза. **Практическая значимость:** Разработанные технические решения, применимые при изготовлении современных и модернизации эксплуатируемых электровозов, обеспечат повышение тяговых свойств электровозов однофазно постоянного тока и будут способствовать увеличению пропускной и провозной способности сети железных дорог.

**Ключевые слова:** Электропривод электровозов однофазно постоянного тока, независимое возбуждение коллекторных тяговых электродвигателей, управляемый полупроводниковый транзисторный преобразователь возбуждения, алгоритмы управления.

В соответствии с указом президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204 предусмотрено развитие Восточного полигона

с увеличением пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн тонн в год [1, 2].

Для реализации поставленных задач необходимо выполнить разработку и внедрение на полигонах обращения локомотивов нового поколения для вождения поездов 7100–8000 тонн и более с улучшенными тяговыми и энергетическими характеристиками, обеспечивающими повышенный КПД и коэффициент мощности, снижение расхода электроэнергии на 15 % против существующих аналогов.

В связи с этим становятся актуальными исследования по максимальному использованию тяговых свойств локомотивов с разработкой технических решений, обеспечивающих изменяемую жесткость тяговых характеристик, повышение уровня устойчивости к буксованию, снижению энергетических потерь, внедрение современных систем автоматического управления. Поиск таких решений совершался и ранее [3–5].

В 2013 году на Новочеркасском электровозостроительном заводе разработан ЗЭС5К «Ермак» № 434, и с июля 2019 года выпускается модификация этих электровозов с поосным регулированием силы тяги [6, 7]. На каждой секции этих электровозов установлены четыре ВИПа с четырьмя сглаживающими реакторами для индивидуального питания каждого тягового электродвигателя (ТЭД), а также один выпрямитель возбуждения для независимого возбуждения ТЭД в режимах тяги и рекуперативного торможения (рис. 1).

Испытания этого электровоза на наиболее сложном профиле пути Восточно-Сибирской железной дороги на участке Тайшет — Таксимо, а также на участках Транссиба показали, что у этих электровозов имеется ряд существенных недостатков. Так, например, посекционный переход в независимое возбуждение тяговых электродвигателей при снижении скорости до 55 км/ч сопровождается размыканием силовой цепи секции электровоза. При этом сила тяги этой секции становится равна нулю, что сопровождается снижением силы тяги при переходе в независимое возбуждение одной секции на 455 кН, на двух секциях — на 549 кН и на трех секциях — на 780 кН (рис. 2) [8].

Такое скачкообразное уменьшение силы тяги вызывает резкие изменения продольных динамических сил в автосцепках, вызывающих появление продольных ударов в поезде.

Для исключения этих недостатков в настоящей работе предложено техническое решение (рис. 3) на основе применения индивидуальных управляемых мостовых транзисторных преобразователей возбуждения (УПВ), которые шунтируют каждую обмотку возбуждения (ОВ) [5, 9]. Эти УПВ подключены к отдельным источникам питания, от отдельных секций вторичных обмоток тягового трансформатора и могут работать как в режиме тяги, так и в режиме рекуперации без разрыва силовой цепи, обеспечивая индивидуальное автоматическое управление токами возбуждения и реализуя заданную жесткость тяговых характеристик.

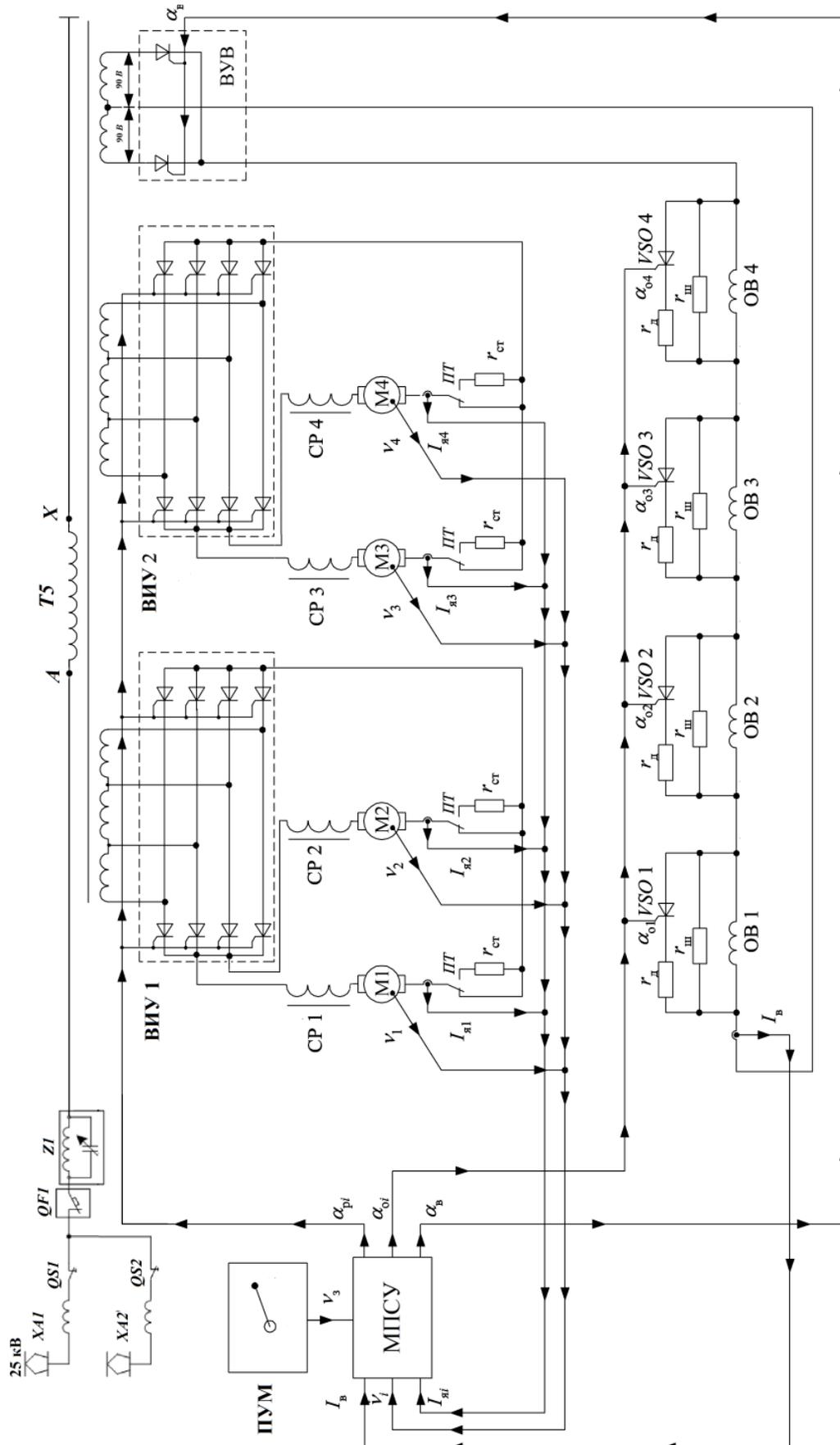


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей секции эксплуатируемого электровазла 3ЭС5К с управляемыми преобразователями возбуждения

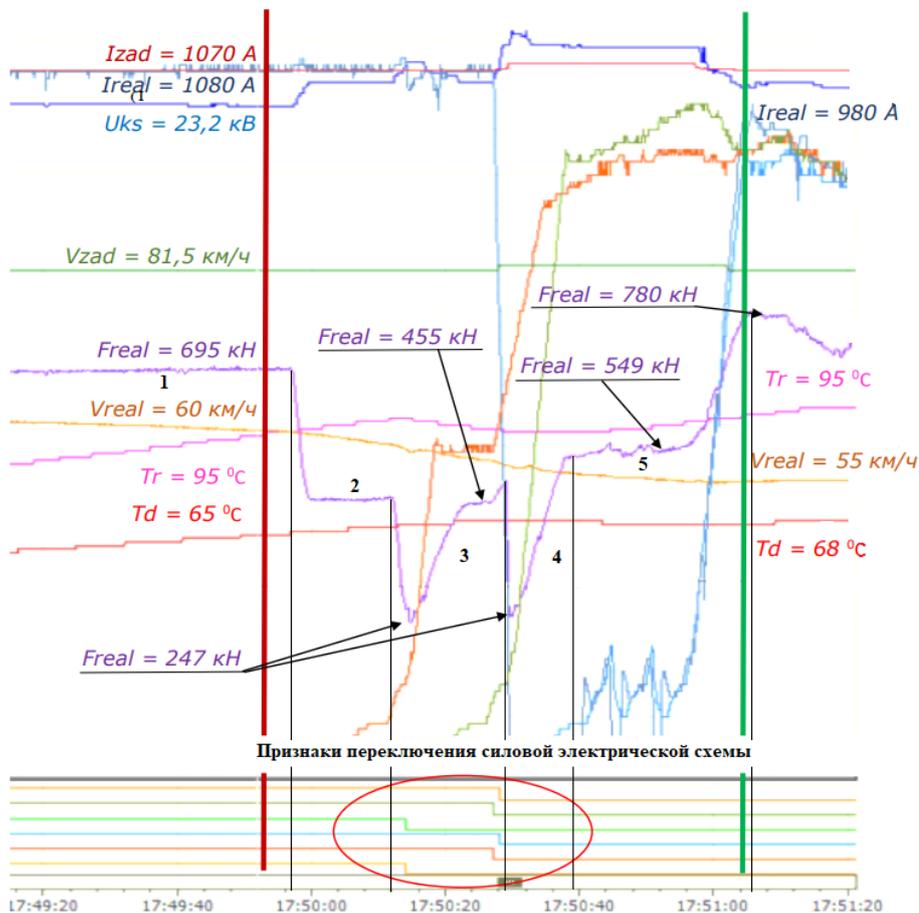


Рис. 2. Регистрация параметров снижения силы тяги электровоза при движении на критическом подъеме

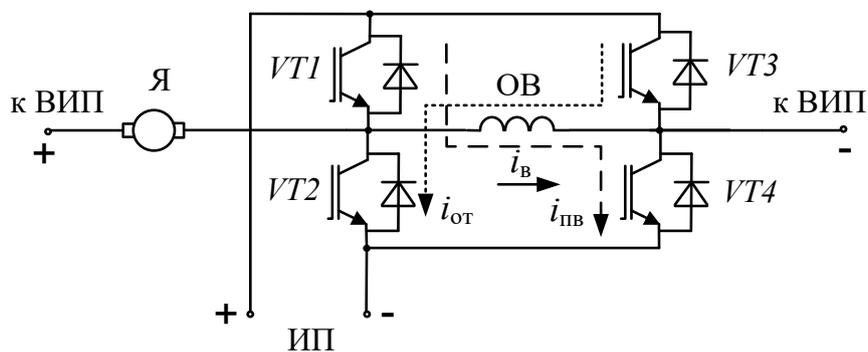


Рис. 3. Схема мостового управляемого преобразователя (УПВ)

В силовой схеме электровоза (рис. 4) предусмотрено использование традиционной схемы питания двух тяговых электродвигателей (ТЭД) от отдельного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) [8–13]. Предлагаемая силовая схема электровоза обеспечивает возможность системе автоматического управления выполнять индивидуальное управление ВИПами для потележечного управления силой тяги, а также индивидуальное управление УПВ для индивидуального поосного управления силой тяги в пределах каждой тележки. Кроме того, возможна

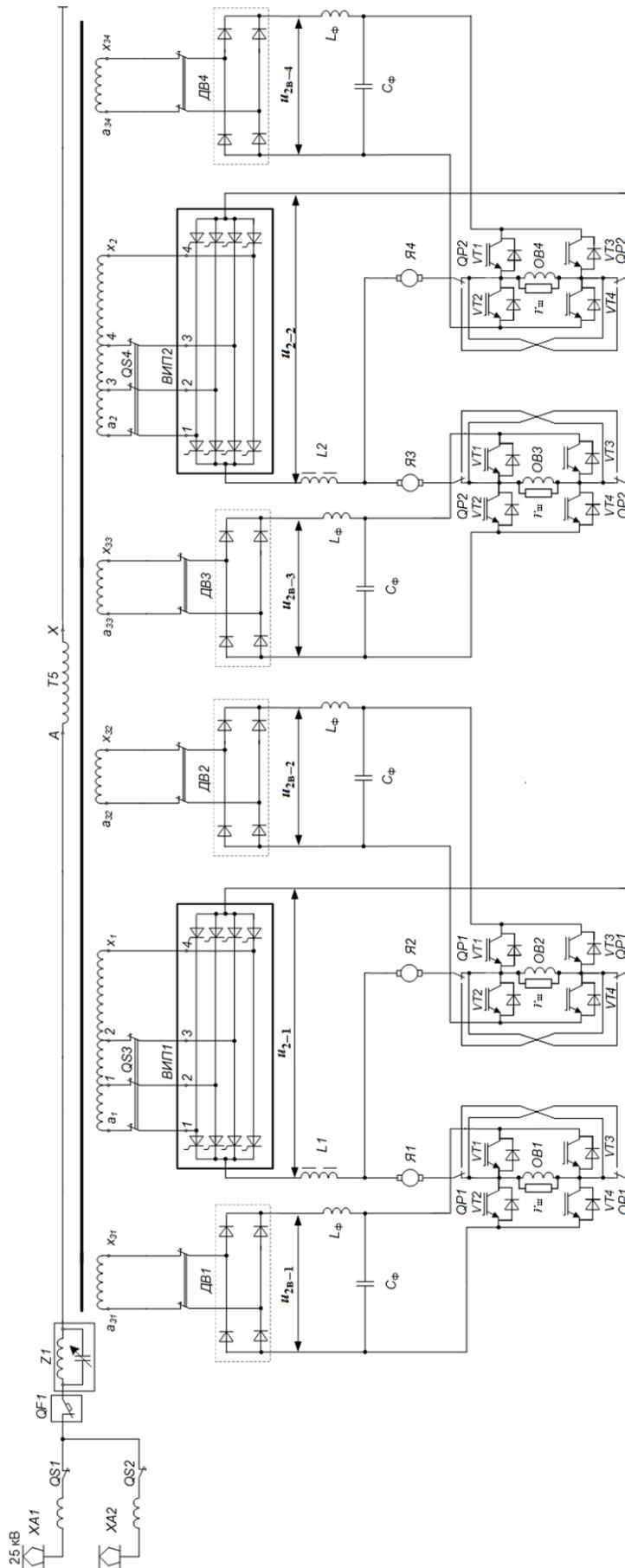


Рис. 4. Упрощенная схема силовых цепей электроваза с управляемыми преобразователями возбуждения

реализация режимов независимого и последовательного возбуждения ТЭД, соответствующих характеристикам постоянства силы тяги или бустерным характеристикам повышенной силы тяги, а также характеристикам постоянства мощности.

Еще одно существенное преимущество новой силовой схемы электровоза состоит в том, что предложенный способ управления токами возбуждения ТЭД от индивидуальных преобразователей УПВ позволяет выполнять переходы на режимы независимого и последовательного возбуждения без разрыва силовой цепи и, следовательно, без потери силы тяги.

При включении транзисторов  $VT1$  и  $VT4$  (рис. 3, 4) будет происходить подпитка обмотки возбуждения током  $i_{пв}$  от независимого источника питания. Если же включить вентили  $VT2$  и  $VT3$ , то будет происходить отпитка обмотки возбуждения током  $i_{ов}$  от того же источника. Используя токи подпитки и отпитки, можно обеспечить режимы работы тягового двигателя с независимым возбуждением, изменяя эти токи так, чтобы алгебраическая сумма этих токов и тока возбуждения двигателя  $i_b$  была постоянной и заданному значению тока независимого возбуждения  $i_{нв}$ :

$$i_{нв} = i_b + i_{пв} = \text{const}, \quad (1)$$

который может быть больше или меньше, чем  $i_b$ .

Управление электровозом на основе (1) позволит реализовать тяговую характеристику, изменяющуюся по закону постоянства силы тяги с различными значениями  $F_k = \text{const}$ .

При реализации режима отпитки можно также обеспечивать работу тягового двигателя в режиме последовательного возбуждения с уменьшением тока возбуждения («ослабления» поля):

$$i_{пв} = i_b - i_{ов} = \beta i_b, \quad (2)$$

где  $i_{ов} = (1 - \beta) i_b$ , а  $\beta$  — коэффициент уменьшения тока возбуждения (коэффициент «ослабления» поля).

Управление электровозом на основе (2) позволит реализовать тяговую характеристику, изменяющуюся по закону постоянства мощности.

И наконец, если не включать вентили УПВ, то тяговый двигатель будет работать в обычном режиме последовательного возбуждения.

Алгоритм управления электровозом, реализованный в контроллере машиниста, предусматривает поочередное включение ТЭД отдельных тележек каждой секции электровоза. Это обусловлено тем, что при трогании происходит перераспределение вертикальных нагрузок, передаваемых от колесных пар на рельсы, вызванных двумя причинами. Первой причиной является то, что передача силы тяги от секции

на состав происходит через автосцепку, расположенную на высоте  $h_a$  от центра масс кузова, в результате чего возникает момент, поворачивающий кузов. При этом задние тележки дополнительно догружаются, а передние — разгружаются.

Второй причиной является то, что изменение вертикальных нагрузок колесных пар возникает при развитии вращающего момента ТЭД из-за действия реакций, передаваемых от остовов двигателей через их подвески к рамам тележек. Из-за совместного действия двух этих причин разгрузки колесных пар можно считать, что первая ось первой тележки каждой секции электровоза (первый ТЭД) реализует силу тяги, меньшую на 10 %, вторая ось (второй ТЭД) реализует силу тяги, меньшую на 5 %. Тогда третий и четвертый ТЭД реализуют силы тяги на 5 и 10 % большие, чем сила тяги секции электровоза.

Учет влияния этих условий вызывает необходимость поочередного включения в работу вначале задних тележек последней секции электровоза, затем предыдущей и т. д. После того как все задние тележки включатся в работу, в такой же последовательности будут включаться в работу и передние тележки этих секций.

Для проверки предложенного алгоритма управления были выполнены расчеты электромагнитных и электромеханических процессов изменения токов двигателей, токов подпитки и сил тяги ТЭД [11–13]. Для примера рассмотрим процесс набора силы тяги при трогании трех секционного электровоза (рис. 5). Из этого рисунка видно, что после того, как произошло увеличение силы тяги шестой тележки, в работу включается четвертая, потом вторая, а затем уже пятая, третья и первая.

В результате такого плавного процесса трогания создаются наилучшие условия для реализации сцепления колес с рельсами.

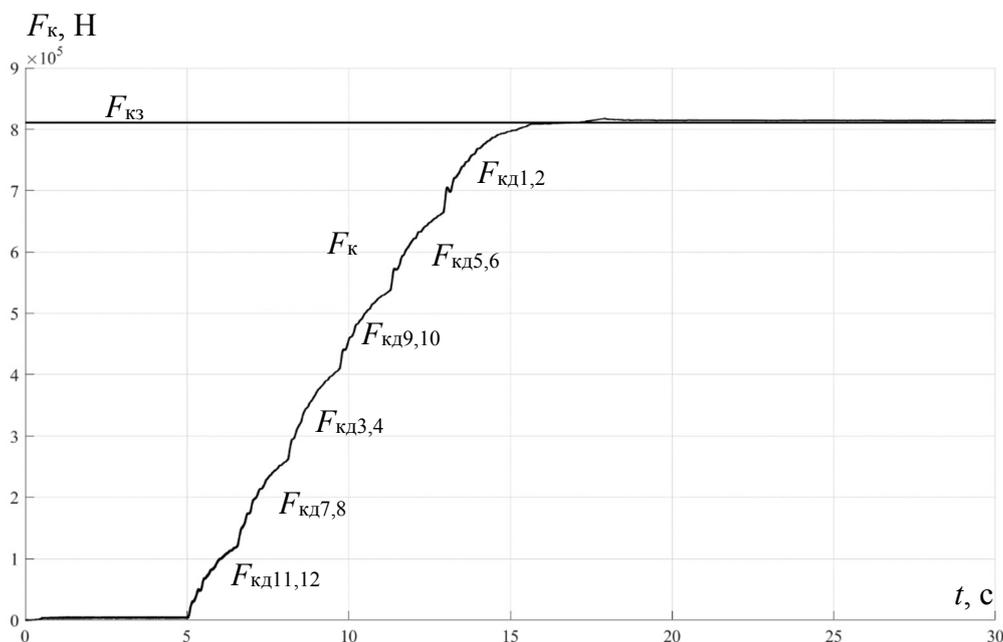


Рис. 5. График изменения силы тяги электровоза

## Выводы

1. Применение управляемых транзисторных преобразователей (УПВ) позволяет выполнять плавное управление токами возбуждения для реализации характеристик последовательного и независимого возбуждения без разрыва силовой цепи.

2. Применение УПВ совместно с типовой схемой питания двигателей одной тележки от отдельного ВИПа позволяет реализовать схемы плавного потележечного и поосного (в пределах каждой тележки) управления силой тяги электровоза без размыкания силовой цепи.

3. Предложенные силовая схема и законы управления токами возбуждения позволяют реализовать тяговые характеристики, изменяющиеся по законам постоянства силы тяги и постоянства мощности, что приближает электровозы с коллекторными тяговыми электродвигателями к электровозам с асинхронными тяговыми двигателями.

4. Проверка предложенного алгоритма поосного управления силой тяги показала, что такой алгоритм обеспечивает плавное увеличение этой силы и создает лучшие условия для сцепления колес электровоза с рельсами.

## Библиографический список

1. Указ президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204.
2. Распоряжение Правительства РФ от 30 сентября 2018 г. № 2101-р (ред. от 9 декабря 2022 г.) «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года».
3. Головатый А. Т. Авторское свидетельство № 393138. СССР, МПК 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.
4. Головатый А. Т. Независимое возбуждение тяговых двигателей электровозов / А. Т. Головатый, И. П. Исаев, Е. В. Горчаков. — М.: Транспорт, 1976. — 152 с.
5. Бабков Ю. В. Патент № 2399514. Российская Федерация, МПК В60L 11/06. Тяговый электропривод транспортного средства / Ю. В. Бабков, Ю. И. Клименко, Ю. А. Варегин, Е. Г. Суркова. — Заявл. 13.05.2009; опубл. 20.09.2010. — Бюл. № 26.
6. Задорожный В. Л. Особенности электровозов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги / В. Л. Задорожный // Локомотив. — 2019. — № 10. — С. 11–16.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации / Новочеркасский электровазостроительный завод. — Новочеркасск, 2007. — Т. 1, 635 с. — Т. 2, 640 с.
8. Михальчук Н. Л. Электровоз с плавным управлением в режимах независимого и последовательного возбуждения тяговых электродвигателей / Н. Л. Михальчук, О. Е. Пудовиков, А. Н. Савоськин и др. // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 9. — С. 35–39.

9. Михальчук Н. Л. Силовая схема электровоза переменного тока с применением управляемого транзисторного преобразователя возбуждения / Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин, А. А. Чучин // *Электроника и электрооборудование транспорта*. — 2022. — № 3. — С. 18–22.

10. Попов Ю. И. Патент № 2788223. Российская Федерация, МПК В60L 9/02, В60L 9/12, H02P 7/28. Электрический привод электровоза / Ю. И. Попов, Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин и др. — Заявл. 22.10.2022; опубл. 17.01.2023. — Бюл. № 2.

11. Евсеев В. Ю. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с раздельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин // *Электротехника*. — 2020. — № 9. — С. 32–38.

12. Михальчук Н. Л. Электромагнитные процессы в силовой схеме электровоза с управляемым преобразователем возбуждения / Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин, А. А. Чучин // *Электротехника*. — 2022. — № 9. — С. 34–42. — DOI: 10.53891/00135860.2022.9.34-42.

13. Попов Ю. И. Патент № 2787135. Российская Федерация, МПК G05F 1/10. Способ автоматического управления током тяговых электродвигателей подвижного состава / Ю. И. Попов, Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин и др. — Заявл. от 29.03.2022; опубл. 29.12.2022. — Бюл. № 1.

Дата поступления: 06.05.2023

Решение о публикации: 25.05.2023

#### **Контактная информация:**

МИХАЛЬЧУК Николай Львович — канд. техн. наук; [MihalchukNL@center.rzd.ru](mailto:MihalchukNL@center.rzd.ru)

ПОПОВ Юрий Иванович — канд. техн. наук; [Popov@pkbct.ru](mailto:Popov@pkbct.ru)

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — д-р техн. наук, проф.

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц.

ЧУЧИН Антон Александрович — канд. техн. наук, доц.

## **Improving the Efficiency of the Electric Locomotive Drive with a Controllable Converter for Traction Motor Excitation**

**N. L. Mihalchuk<sup>1</sup>, Yu. I. Popov<sup>2</sup>, A. N. Savoskin<sup>3</sup>, O. E. Pudovikov<sup>3</sup>, A. A. Chuchin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Joint Stock Company “Russian Railways” (JSCo “RZD”), Directorate of Locomotive Traction, 6a/4, Basmanny tupik, Moscow, 107174, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint Stock Company “Russian Railways” (JSCo “RZD”), Locomotive Engineering Drafting Bureau, 205, Olkhovskiy pereulok, Moscow, 105066, Russian Federation

<sup>3</sup>Russian University of Transport, 9/9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Mihalchuk 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. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 104–114. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-104-114

## Summary

**Purpose:** To substantiate the circuit design and algorithms for individual smooth and automatic control of single-phase direct current electric locomotives according to the laws of constant traction force and constant power without breaking the electric locomotive power circuits in order to increase the efficiency of its electric drive with controllable traction motor excitation converters. As a circuit design solution, it is proposed to apply a power electrical circuit with two rectifier-inverter converters for each section of the electric locomotive for bogie-based traction control, as well as individually controlled bridge transistor converters, shunting field windings, for axial traction control within each bogie. **Methods:** The development of circuit solutions using modern power semiconductor converters; theory of automatic control and design of finite state machines; mathematical modeling of electromagnetic, electromechanical and mechanical processes. **Results:** The developed control algorithms provide the possibility of obtaining traction characteristics of an electric locomotive that vary according to the laws of constancy of traction force or constancy of power, bringing the traction characteristics of electric locomotives with collector traction motors to the characteristics of electric locomotives with asynchronous traction motors. The calculations performed confirmed the possibility of implementing an algorithm for individual control of traction motor currents and their excitation currents, as well as traction forces, which ensures a smooth increase in the traction force of an electric locomotive. **Practical significance:** The developed technical solutions applicable in the manufacture of modern and modernization of operated electric locomotives will ensure an increase in the traction properties of single-phase DC electric locomotives and will contribute to an increase in the throughput and carrying capacity of the railway network.

**Keywords:** Electric drive of single-phase DC electric locomotives, independent excitation of collector traction motors, controlled semiconductor transistor excitation converter, control algorithms.

## References

1. Ukaz prezidenta Rossiyskoy Federatsii "O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh raz-vitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda" ot 7 maya 2018 g. № 204 [Decree of the President of the Russian Federation "On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024" dated May 7, 2018 № 204]. (In Russian)
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 30 sentyabrya 2018 g. № 2101-r (red. ot 9 dekabrya 2022 g.) "Ob utverzhdenii kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda" [Decree of the Government of the Russian Federation of September 30, 2018 № 2101-r (as amended on December 9, 2022) "On approval of a comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period up to 2024"]. (In Russian)
3. Golovatyy A. T., Finkel'shteyn L. Ya., Shamraev N. L. et al. *Avtorskoe svidetel'stvo № 393138. SSSR, MPK B60L 9/12. Elektricheskiy privod. Zayavl. 10.06.1971 g.; opubl. 07.07.84 g. Byul. № 25* [Copyright certificate № 393138. USSR, IPC B60L 9/12. Electric locomotive drive. Appl. 06.10.1971; publ. 07.07.84, Bull. № 25]. (In Russian)
4. Golovatyy A. T., Isaev I. P., Gorchakov E. V. *Nezavisimoe возбуждение тяговых двигателей электровозов* [Independent excitation of traction motors of electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1976, 152 p. (In Russian)
5. Babkov Yu. V., Klimenko Yu. I., Vargin Yu. A. et al. *Tyagovyy elektroprivod transportnogo sredstva* [Traction electric drive of a vehicle]. Patent RF, no. 2399514. (In Russian)

6. Zadorozhnyy V. L. Osobennosti elektrovozov serii “Ermak” s poosnym regulirovaniem sily tyagi [Features of electric locomotives of the Ermak series with axial control of the traction force]. *Lokomotiv* [Lokomotiv]. 2019, Iss. 10, pp. 11–16. (In Russian)
7. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Novocherkasskiy elektrovozostroitel'nyy zavod* [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual. Novocherkassk Electric Locomotive Plant]. Novocherkassk, 2007, vol. 1, 635 p., vol. 2, 640 s. (In Russian)
8. Mikhal'chuk N. L., Pudovikov O. E., Savos'kin A. N. Elektrovoz s plavnym upravleniem v rezhimakh nezavisimogo i posledovatel'-nogo vzbuzhdeniya tyagovykh elektrodvigately [Electric locomotive with smooth control in the modes of independent and sequential excitation of traction motors]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Zheleznodorozhny transport]. 2022, Iss. 9, pp. 35–39. (In Russian)
9. Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N., Chuchin A. A. Silovaya skhema elektrovoza peremennogo toka s primeneniem upravlyaemogo tranzistornogo preobrazovatelya vzbuzhdeniya [Power circuit of an alternating current electric locomotive using a controlled transistor excitation converter]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2022, Iss. 3, pp. 18–22. (In Russian)
10. Popov Yu. I., Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N. *Elektricheskiy privod elektrovoza* [Electric locomotive drive]. Patent RF, no. 2788223, 2023. (In Russian)
11. Evseev V. Yu., Savos'kin A. N. Matematicheskaya model' kollektornogo tyagovogo dvigatelya s razdel'nym uchetom vikhrevykh tokov glavnykh i dobavochnykh polyusov [Mathematical model of a collector traction motor with separate accounting for eddy currents of the main and additional poles]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2020, Iss. 9, pp. 32–38. (In Russian)
12. Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N., Chuchin A. A. Elektromagnitnye protsessy v silovoy skheme elektrovoza s upravlyaemym pre-obrazovatelem vzbuzhdeniya [Electromagnetic processes in the power circuit of an electric locomotive with a controlled excitation converter]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 34–42. DOI: 10.53891/00135860.2022.9.34-42. (In Russian)
13. Popov Yu. I., Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N. *Sposob avtomaticheskogo upravleniya tokom tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava* [The method of automatic control of the current of traction electric motors of rolling stock]. Patent RF, no. 2787135. (In Russian)

Received: May 06, 2023

Accepted: May 25, 2023

**Author's information:**

Nikolay L. MIKHALCHUK — PhD in Engineering; MihalchukNL@center.rzd.ru

Yuri I. POPOV — PhD in Engineering; Popov@pkbct.ru

Anatoly N. SAVOSKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor

Anton A. CHUCHIN — PhD in Engineering, Associate Professor