

Плавное регулирование возбуждения на электровозах однофазно-постоянного тока

В. В. Макаров¹✉, В. В. Семченко²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

² АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, Российская Федерация

✉ makarov_vv@irgups.ru

Резюме

Повышение энергетической и эксплуатационной эффективности использования электроподвижного состава – стратегическая задача локомотивного комплекса ОАО «Российские железные дороги» и компании в целом. Обе задачи решаются с помощью повышения тяговых и сцепных качеств электровозов и увеличения их энергетических показателей. В настоящее время на электровозах однофазно-постоянного тока Дирекции тяги ОАО «Российские железные дороги» применяется плавное зонно-фазовое регулирование скорости изменением напряжения, для расширения диапазона ее регулирования используется изменение магнитного потока. Одним из способов регулирования магнитного потока (намагничивающей силы) главных полюсов тяговых электрических двигателей является ступенчатый, или контакторно-реостатный способ. Такой способ не позволяет использовать всю область возможного изменения магнитного потока. На электровозах основных серий грузового движения ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЭС5К реализовано три ступени регулирования магнитного потока. Последняя позиция при регулировании скорости считается резервной, она обеспечивает около 10 % диапазона регулирования. Таким образом, в конструкцию заведомо закладывается существенный недостаток. Плавное регулирование намагничивающей силы тягового электрического двигателя позволяет расширить диапазон регулирования силы тяги, улучшить энергетические показатели электровоза. В статье отмечены другие недостатки традиционной ступенчато-реостатной системы, рассмотрены электромагнитные процессы в цепи выпрямленного тока, показан плавный, ранее не описанный способ реализации регулирования магнитного потока главных полюсов, обоснован метод его изменения на традиционной элементной базе.

Ключевые слова

электровозы однофазно-постоянного тока, регулирование магнитного потока, электромагнитные процессы, энергетические показатели

Для цитирования

Макаров В. В. Плавное регулирование возбуждения на электровозах однофазно-постоянного тока / В. В. Макаров, В. В. Семченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 188–194. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).188-194

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.09.2021, поступила после рецензирования: 19.10.2021, принята к публикации: 23.10.2021

Smooth excitation control on single-phase-direct current electric locomotives

V. V. Makarov¹✉, V. V. Semchenko²

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² «Road Implementation Center of Krasnoyarsk Railroad», Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ makarov_vv@irgups.ru

Abstract

Increasing the energy and operational efficiency of the use of electric rolling stock is a strategic task of the locomotive complex of JSC “Russian Railways” and the company as a whole. Both tasks are solved by increasing the traction and coupling qualities of electric locomotives and increasing their energy performance. Currently, single-phase DC electric locomotives of the Traction Directorate of JSC “Russian Railways” use smooth zone-phase regulation of speed by changing voltage, to expand the range of its regulation, a change in magnetic flux is used. One of the ways to regulate the magnetic flux (magnetizing force) of the main poles of traction electric motors is a stepwise, or contactor-rheostatic method. This method does not allow using the entire area of possible changes in the magnetic flux. Three stages of magnetic flux regulation are implemented on electric locomotives of the main series of freight traffic VL80R, VL85, 2ES5K. The last position when adjusting the speed is considered a backup, it provides about 10 % of the control range. Thus, a significant drawback is obviously laid in the design. Smooth regulation of the magnetizing force of a traction electric motor allows you to expand the range of traction force regulation, improve the energy performance of an electric locomotive. The article notes other shortcomings of the traditional step-rheostat system, considers

electromagnetic processes in the rectified current circuit, shows a smooth, previously undescribed method of implementing the regulation of the magnetic flux of the main poles, justifies the method of its change on the traditional element base.

Keywords

single-phase direct current electric locomotives, magnetic flux regulation, electromagnetic processes, energy indicators

For citation

Makarov V. V., Semchenko V. V. Plavnoe regulirovanie vzbuzhdeniya na elektrovozakh odnofazno-postoyannogo toka [Smooth excitation control on single-phase-direct current electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4(72), pp. 188–194. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).188-194

Article Info

Received: 05.09.2021, Revised: 19.10.2021, Accepted: 23.10.2021

Введение

Повышение энергетической и эксплуатационной эффективности использования электроподвижного состава – стратегическая задача локомотивного комплекса ОАО «РЖД» и компании в целом [1, 2].

Регулирование возбуждения (РВ) на электровозах и электроподвижном составе в целом применяется как способ регулирования их скорости или силы тяги [3]. Наиболее известны два способа регулирования магнитного потока (намагничивающей силы): регулирование величины тока возбуждения, протекающего через обмотку возбуждения тягового электрического двигателя (ТЭД); изменение числа ее витков [4]. Второй способ не применяется как из-за усложнения самого двигателя и снижения его надежности, так и из-за снижения его технико-экономических показателей.

Регулирование тока через обмотку возбуждения осуществляется, как правило, контактно-реостатным способом. При таком регулировании параллельно обмотке возбуждения включаются регулируемые по величине активного сопротивления резисторы. Регулирование осуществляется силовыми пневматическими контакторами. Последовательно с резисторами включаются индуктивные шунты. Индуктивность в цепи РВ защищает ТЭД от перегрузки при возможных резких колебаниях напряжения на тяговом двигателе.

Глубина РВ характеризуется коэффициентом РВ β , равным отношению намагничивающей силы главных полюсов при уменьшенном (ослабленном) возбуждении к намагничивающей силе при полном возбуждении (отключенной цепи регулирования). Минимальное значение β определяется коммутационной

надежностью двигателя и реализуется активным сопротивлением индуктивного шунта.

Количество ступеней регулирования магнитного потока на разных сериях электровозов может отличаться. Их увеличение повышает использование потенциальных тяговых качеств, а значит и энергетических показателей работы электроподвижного состава (ЭПС). Вместе с тем увеличение количества позиций (ступеней) регулирования ведет к изменению массогабаритных показателей системы, ее удорожанию, а значит и снижению надежности.

Описанная система РВ применяется на всех серийных эксплуатируемых электровозах грузового и пассажирского движения [5–7]. Аналогичные системы применяются и на подвижном составе городского электрического транспорта [8].

Недостатки типового способа регулирования возбуждения и способы их устранения

Ступенчатое регулирование намагничивающей силы главных полюсов ТЭД не позволяет полностью использовать весь возможный диапазон регулирования силы тяги, скорости. Колебания тока ТЭД снижают энергетические характеристики электровоза, качество электрической энергии на его токоприемнике и в системе тягового электроснабжения в целом.

На электровозах серии ЭС5К (Ермак) [5] применено автоматическое регулирование возбуждения тяговых машин, но по принципу регулирования оно не отличается от применяемых на других сериях электровозов.

Устранить ряд указанных недостатков позволяет плавное регулирование магнитного потока, которое возможно с применением тиристорных преобразователей, включаемых по-

следовательно с резистором и сглаживающим реактором в описанной схеме.

Применение неуправляемых тиристоров в цепях постоянного тока для регулирования напряжения на участке цепи или его работа в качестве ключа требует цепей для искусственного запираания тиристоров с использованием реактивных элементов [9–15]. В маломощных системах применение таких цепей оправдано, что связано с их приемлемыми массогабаритными и энергетическими показателями. Использование запираемых тиристоров делает задачу решаемой без цепей искусственной коммутации [16].

Электровозы «Ермак» идут на смену электровозам ВЛ80Р и ВЛ85 [6, 7], в ближайшие годы «Ермак» станет основным электровозом грузового движения на участках, электрифицированных однофазным переменным током. В преобразовательных установках электровоза применены не запираемые управляемые на открытие полупроводниковые приборы-тиристоры. Для открытия тиристора на нем должно быть прямое напряжение величиной не ниже порогового и управляющий импульс установленных параметров, а для закрытия необходимо, чтобы

ток через него был ниже величины тока удержания. Для снижения тока ниже указанного значения к нему необходимо приложить обратное напряжение, в том числе и от постороннего источника. Ток может снизиться и естественным путем. Источником обратного напряжения может выступать напряжение преобразователя электровоза, что является наиболее предпочтительным (естественное закрытие). Как указано, искусственное закрытие в нашем случае следует считать нецелесообразным.

В цепях электровозов однофазно-постоянного тока имеются элементы, способные накапливать и отдавать электрическую энергию, такими элементами являются обмотки трансформаторов, тяговых двигателей, сглаживающих реакторов, индуктивных шунтов и другие, а также конденсаторы защитных и функциональных цепей. Индуктивности указанных элементов в значительной мере определяют электромагнитные процессы в цепях электровоза, а также его энергетические характеристики [3, 9, 10].

На рис. 1 представлены кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора и выпрямленного напряжения при питании ТЭД от

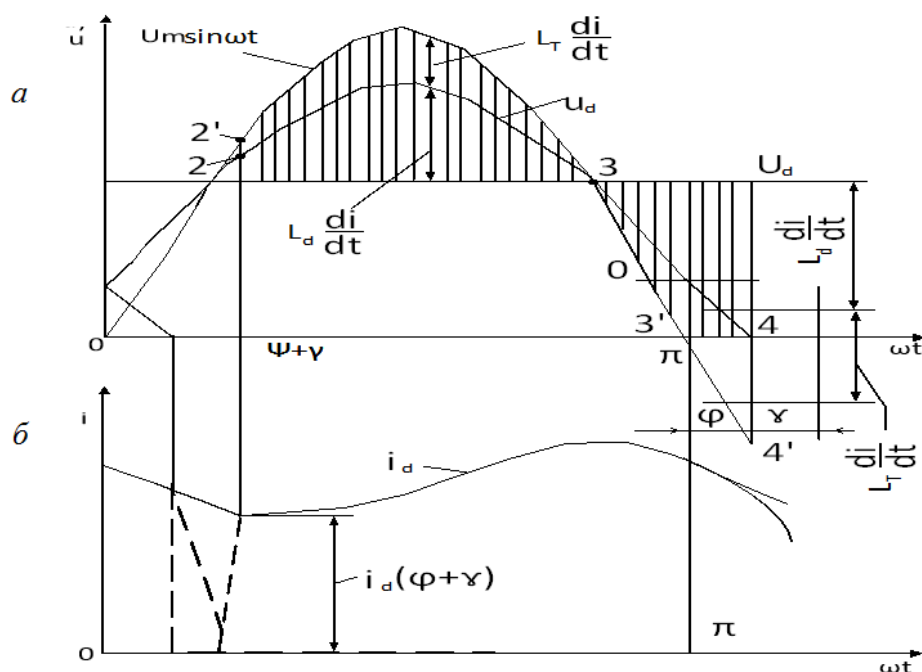


Рис. 1. Кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора (а) и выпрямленного напряжения (б) при питании тягового электрического двигателя от мостового неуправляемого преобразователя

Fig. 1. Curves of the voltage of the secondary winding of the transformer (a) and the rectified voltage when (b) the traction electric motor is powered from the bridge uncontrolled converter

мостового неуправляемого преобразователя с учетом индуктивностей обмоток трансформатора, сглаживающего реактора [3, 10]. Рисунок поясняет их влияние на зависимости во времени кривых напряжений и токов цепей переменного и постоянного токов.

Кривые при плавном зонно-фазовом регулировании напряжения и токи будут выглядеть аналогично при минимальных углах открытия тиристоров преобразователя.

Штатная схема регулирования магнитного потока (возбуждения) тягового электрического двигателя представлена на рис. 2. Для реализации трех ступеней регулирования возбуждения необходимы три пневматических контактора, один из которых с дугогашением, резистор с тремя выводами, а также индуктивный шунт.

На рис. 3 представлены кривые выпрямленного напряжения на тяговом электрическом

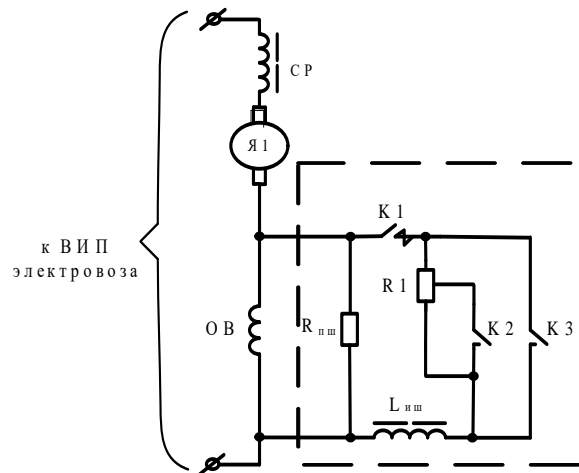


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема регулирования возбуждения тягового электрического двигателя электровоза

Fig. 2. Electrical schematic diagram regulation of excitation of traction electric motor electric locomotive

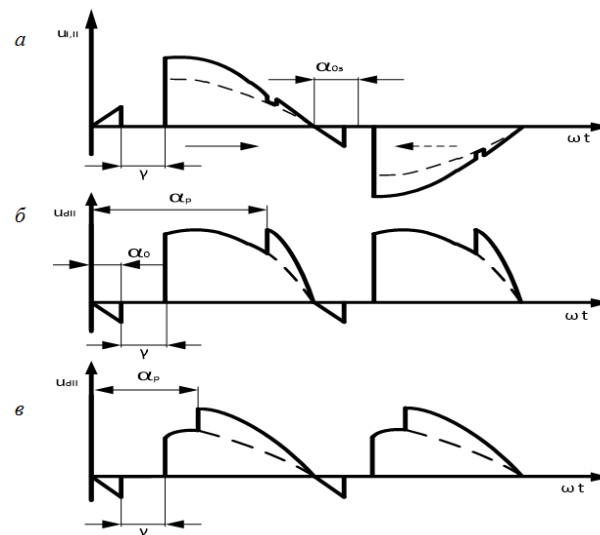


Рис. 3. Кривые напряжений при плавном зонно-фазовом регулировании напряжения секций 1 и 2 вторичной обмотки тягового трансформатора (а) и выпрямленного в начале второй зоны регулирования (б) и в конце ее (в)

Fig. 3. Voltage curves for smooth zone-phase voltage regulation of sections 1 and 2 of the secondary winding of the traction transformer (a) and rectified at the beginning of the second control zone (b) and at the end of it (c)

двигателе при плавном зонно-фазовом регулировании напряжения и напряжение на вторичной обмотке трансформатора [17].

Из рис. 3 видно, что в начале каждого полупериода к цепи выпрямленного тока прикладывается напряжение секций вторичной обмотки тягового трансформатора отрицательного значения. Напряжение прикладывается на отрезке $0 - \alpha_0$. В момент α_0 величина отрицательного напряжения составляет $u = U_m \sin \omega t$. Действующие значения напряжений секций вторичной обмотки трансформатора имеют номинальные значения 315 или 630 В. В момент α_0 напряжение достигает значения, достаточного для открытия тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя. Отсчет значения угла регулирования (открытия) α_0 тиристоров начинается в момент перехода напряжения сети через ноль и заканчивается при достижении потенциальных условий на плече, потенциальные условия отслеживаются автоматически. Вместе с тем значение угла, как показывает практика, составляет около 10 эл. град. Мгновенное напряжение на секции вторичной обмотки трансформатора при его действующем номинальном значении 315 В при этом принимает значение 77,4 В.

Предлагаемый способ плавного регулирования возбуждения

При выполнении работы [18] параллельно обмоткам возбуждения были постоянно подключены последовательно включенные резистор R_k сопротивлением 0,021 Ом и тиристор Т2-320. Тиристор открывали «пачкой» импуль-

сов в заданный наперед момент, в начале следующего полупериода питающего напряжения тиристор закрывался под действием потенциалов на элементах цепи постоянного тока ТЭД.

Полученный ранее неизвестный эффект позволяет сделать вывод, что возможно плавное РВ без применения искусственной коммутации для закрытия неуправляемых тиристоров.

Использованные ранее в работе [18] устройства позволяют реализовать указанный способ плавного регулирования магнитного потока ТЭД. Прототип устройства представлен на рис. 4.

В цепи тиристора регулирования возбуждения отсутствует ограничивающий резистор R_k , минимальный ток и β_{\min} будут обеспечены, в том числе и при пробое тиристора, сглаживающим реактором. При применении данного устройства позволит плавно регулировать намагничивающую силу ТЭД во всем диапазоне от β_0 до β_{\min} . Количество контакторов уменьшится до одного, шунтирующий резистор с тремя выводами из цепи может быть исключен.

Выводы

1. Анализ электромагнитных процессов в цепях постоянного тока электровоза однофазно-постоянного тока показал, что отрицательное напряжение на выходе выпрямительно-инверторного преобразователя в начале полупериода питающего напряжения позволяет запереть неуправляемый тиристор, включенный параллельно обмотке возбуждения ТЭД, открытый управляющим воздействием в предыдущем полупериоде.

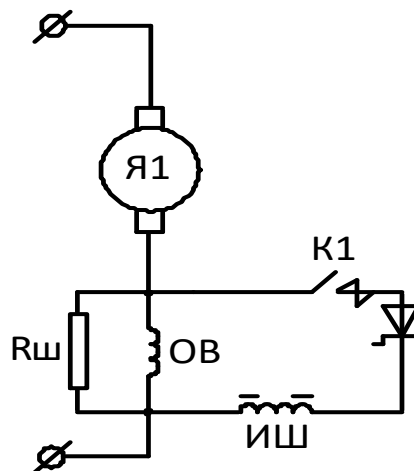


Рис. 4. Прототип устройства для плавного регулирования возбуждения

Fig. 4. Prototype device for modulating excitation control

2. Выявленное явление позволяет говорить о новом способе плавного регулирования магнитного потока ТЭД на электровозах однофазно-постоянного тока.

3. Представлен прототип устройства плавного РВ ТЭД на электровозах однофазно-переменного тока.

Список литературы

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : утв. ОАО «РЖД» №769/р от 17.04.2018.
2. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утв. распоряжением Правительством РФ от 19.03.2019 г. № 466р.
3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. М. : Транспорт, 1980. 431 с.
4. Плакс А.В. Система управления электрическим подвижным составом. М. : Маршрут, 2005. 360 с.
5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Новочеркасск : 2007. В 2 т. Т. 1. 635 с.
6. Электровоз ВЛ80р : Руководство по эксплуатации. М. : Транспорт, 1985. 546 с.
7. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. М. : Транспорт, 1992. 480 с.
8. Корягина Е.Е., Коскин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. М. : Транспорт, 1982. 296 с.
9. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 312 с.
10. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М. : Транспорт, 1958. 277 с.
11. Евстафьев А.М. Электронные системы ослабления возбуждения тяговых двигателей электроподвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 135 с.
12. Мазнев А.С. Баранов В.А., Богданов А.А. Тяговые характеристики электровозов ВЛ10 в режиме усиленного возбуждения // Известия ПГУПС. 2007. № 2. С. 62–69.
13. Мазнев А.С., Шатнев О.И., Евстафьев А.М. Электронные системы регулирования возбуждения для электроподвижного состава // Вестник РГУПС, 2007. № 3. С. 12.
14. Калинин М.В. Электронные системы ослабления возбуждения ТД электровозов переменного тока // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту, 2009. С. 19–29.
15. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Электронные системы управления для электроподвижного состава постоянного тока // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту, 2007. С. 60–69.
16. Volchek T.V. Tomilov V.S., Varenov E.A. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways // Пром-Инжиниринг : материалы междунар. науч.-техн. конф. = 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. 2020.
17. Горбань В.Н., Донской А.Л., Шабалин Н.Г. Электронное оборудование электровоза ВЛ80Р: Ремонт и техническое обслуживание. М. : Транспорт, 1984. 184 с.
18. Макаров В.В. Разработка привода с независимым возбуждением и поосным распределением нагрузок для магистрального подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 1991. 193 с.

References

1. Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga) : utv. OAO «RZHD» №769/r ot 17.04.2018. [White Book of JSC "Russian Railways" No. 769 / r dated 04/17/2018 "Strategy for the scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future until 2030"].
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda : utv. rasporyazheniyem Pravitel'stvom RF ot 19.03.2019 g. № 466r [Long-term development program of Russian Railways until 2025 (approved by the order of the Government of the Russian Federation of 19.03.2019, No. 466r)].
3. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnoy sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskiye skhemy i apparaty [The rolling stock of electrified railways. Theory of work of electrical equipment. Electrical circuits and apparatus]. M.: Transport Publ., 1980. 431 p.
4. Plaks A.V. Sistema upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom [Electric rolling stock control system]. Moscow: Route Publ., 2005, 360 p.
5. Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual]. Novocherkassk, 2007, Vol. 1, 635 p.
6. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnyakov L.A. et al. Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80r: Operation manual]. Moscow: Transport Publ., 1985, 546 p.
7. Electric locomotive VL85: Operation manual / B.A. Tushkanov, N.G. Pushkarev, L.A. Pozdnyakova et al. M. : Transport, 1992. 480 p.
8. Koryagina E.E., Koskin O.A. Elektrooborudovaniye tramvayev i trolleybusov [Electrical equipment of trams and trolley-buses]. M.: Transport Publ., 1982, 296 p.
9. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. M.: Transport Publ., 1988, 312 p.

10. Tikhmenev B.N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with static converters]. Moscow: Transport Publ., 1958. 277 p.

11. Evstafiev A.M. Electronic systems for weakening the excitation of traction motors of electric rolling stock: dis. ... kand. tekhn. nauk [Elektronnyye sistemy oslableniya возбуждения тяговых двигателей электродвизного состава: Ph.D. (Engineering) diss.]. St. Petersburg, 2005. 135 p.

12. Maznev A.S., Baranov V.A., Bogdanov A.A. Tyagovyye kharakteristiki elektrovozov VL10 v rezhime usilennogo возбуждения [Traction characteristics of VL10 electric locomotives in enhanced excitation mode]. *Izvestia PGUPS [Izvestia PGUPS]*, 2007, No. 2, pp. 62–69.

13. Maznev A.S., Shatnev O.I., Evstafiev A.M. Elektronnyye sistemy regulirovaniya возбуждения dlya elektropodvizhnogo sostava [Electronic excitation control systems for electric rolling stock]. *Vestnik RGUPS [Bulletin of RGUPS]*, 2007, No. 3, pp. 12.

14. Kalinin M.V. Elektronnyye sistemy oslableniya возбуждения TD elektrovozov peremennogo toka [Electronic systems for weakening the excitation of TD of AC electric locomotives]. *Izvestia PGUPS. Sovremennyye tekhnologii – transportu [Izvestia PGUPS. Modern technologies for transport]*, 2009, pp 19–29.

15. Maznev A.S., Evstafiev A.M. Elektronnyye sistemy upravleniya dlya elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka [Electronic control systems for DC electric rolling stock]. *Izvestia PGUPS. Sovremennyye tekhnologii – transportu [Izvestia PGUPS. Modern technologies for transport]*, 2007, pp. 60–69.

16. Volchek T.V., Tomilov V.S., Barenov E.A. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways. *Prom-Engineering: Materials. int. scientific and technical conf. (eng. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM)*, 2020.

17. Gorban V.N., Donskoy A.L., Shabalin N.G. Elektronnoye oborudovaniye elektrovoza VL80R: Remont i tekhnicheskoye obsluzhivaniye [Electronic equipment of the VL80R electric locomotive: Repair and maintenance]. M.: Transport Publ., 1984. 184 p.

18. Makarov V.V. Razrabotka privoda s nezavisimym возбуждением i poosnym raspredeleniyem nagruzok dlya magistral'nogo podvizhnogo sostava: dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a drive with independent excitation and axial distribution of loads for main-line rolling stock: Ph.D. (Engineering) diss.]. Omsk, 1991. 193 p.

Информация об авторах

Макаров Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электродвизного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: makarov_vv@irgups.ru.

Семченко Виктор Васильевич – канд. техн. наук, генеральный директор АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, e-mail: office@dcv.ru.

Information about the authors

Viktor V. Makarov – Associate Professor of the Department Electric rolling stock, Irkutsk State University of Railways, Irkutsk, e-mail: makarov_vv@irgups.ru.

Viktor V. Semchenko – Candidate of Technical Sciences, General Director of «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, e-mail: office@dcv.ru.