

11. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZhD» na period do 2030 goda [Development strategy of Russian Railways for the period up to 2030]. Moscow: “RZD” OAO Publ., 20.12.2013.

12. Belogolov Yu.I., Stetsova Yu.M., Olentsevich A.A. Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri upravlenii transportnymi protsessami na zheleznoi doroge [Use of mathematical modeling methods in managing transport processes on the railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. Vol. 1. Pp. 145–148.

13. Astrakhantsev L.A., Astashkov N.P. Obosnovanie metoda postroeniya avtomatizirovannoi sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu motor-ventilyatorov na elektrovozhakh [Justification of the method for constructing an automated system for controlling the performance of motor fans on electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012. No. 3 (62). Pp. 90–95.

14. Taranets I. Tsifrovye tekhnologii sokratyat vremya oformleniya perevozok v pyat' raz [Digital technologies will reduce the time of registration of transportation by five times]. *Gazeta “Gudok”* [Gudok newspaper], 2019.

15. Barkhatov P.I., Upyr' R.Yu. Analiz vliyaniya perekrestnykh tekhnologicheskikh protsessov pri rabote s passazhirskimi poezdami [Analysis of the influence of cross-technological processes when working with passenger trains]. [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019. Vol. 1. Pp. 48–51.

16. Dobrynina D.S., Vlasova A.N., Olentsevich A.A., Belogolov Yu.I. Napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya perevoznogo protsessa [Directions of development and improvement of the transportation process in railway transport. Delivery of goods “just in time”]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2019. No. 1 (3). Pp. 39–47.

17. Rosental's E.M., Buinova N.V. (comp.) Interval'noe regulirovanie: innovatsii i perspektivy razvitiya: tematischeeskaya podborka [Interval regulation: innovations and development prospects: thematic selection]. Resp. for release is E.V. Shavyrkin. Krasnoyarsk: Krtsntib Publ., 2019. 232 p.

18. Urusov A.V. Tsifrovaya zheleznyaya doroga [Digital railway]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication and informatics], 2018. No. 1. Pp. 6–8.

19. Olentsevich V.A. (comp.) Issledovanie i analiz razlichnykh organizatsionnykh, tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh reshenii obespecheniya bezopasnosti funkcionirovaniya podsistem zheleznodorozhnogo transporta: ucheb. posobie [Research and analysis of various organizational, technological and technical solutions for ensuring the safety of railway transport subsystems: a textbook]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017. 138 p.

Информация об авторах

Громышова Светлана Сергеевна – аспирант кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ghromyshova7997@mail.ru

Маштакова Анна Владимировна – магистр по направлению подготовки Технология транспортных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: anna1998425@gmail.com

Information about the authors

Svetlana S. Gromyshova – Ph.D. student of the Subdepartment of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ghromyshova7997@mail.ru

Anna V. Mashtakova – Master's Degree in the Technology of Transport Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: anna1998425@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).166-172

УДК 629.423.1

Повышение технической скорости электроподвижного состава за счет обеспечения плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей

Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко ✉, **В. С. Томилов**

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

✉ novorossrg@mail.ru

Резюме

Одной из важнейших задач стратегических документов ОАО «Российские железные дороги» является повышение грузооборота сети железных дорог к 2025 г. на 42 %. Одним из способов достижения поставленной цели является повышение технической скорости движения грузовых поездов. В настоящее время после достижения максимального напряжения на 4-й зоне регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя дальнейшая регулировка скорости осуществляется изменением магнитного потока за счет подключения параллельно обмоткам возбуждения тяговых электрических двигателей системы ослабления поля контакторно-реостатного типа. В статье рассмотрены недостатки данной системы. Приведено аналитическое обоснование потерь скорости и ускорения при ступенчатом переключении ослабления поля тяговых электрических двигателей электровоза. Для проверки данного утверждения проведено моделирование электровоза переменного тока серии «2ЭС5К» со ступенчатым и с плавным регулированием ослабления поля тяговых электрических двигателей в программном комплексе «Кортес» при следовании по участку Зима – Иркутск-Сортировочный. Результаты моделирования показали, что плавное регулирование ослабления поля тяговых электрических двигателей обеспечивает повышение технической скорости электровоза не менее чем на 2,5 км/ч. Предложена усо-

вершенствованная система ослабления поля тяговых электрических двигателей на базе современных силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов IGBT-транзисторов, обеспечивающих плавное регулирование тока возбуждения. Экономический эффект от внедрения предлагаемой системы на один электровоз серии «ЗЭС5К» составит 393,71 тыс. рублей.

Ключевые слова

электроподвижной состав, система ослабления поля тяговых электрических двигателей, техническая скорость, потери скорости и ускорения, IGBT-транзистор.

Для цитирования

Волчек Т.В. / Повышение технической скорости электроподвижного состава за счет обеспечения плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, В. С. Томилов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 166–172. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).166-172

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.02.2020, поступила после рецензирования: 16.04.2020, принята к публикации: 12.05.2020

Increasing the operating speed of electric rolling stock by providing smooth regulation of the excitation current of the traction electric motors

T. V. Volchek, O. V. Mel'nichenko, S. G. Shramko✉, V. S. Tomilov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ novorossereg@mail.ru

Abstract

One of the most important tasks of the strategic documents of "Russian Railways" OAO is to increase the freight turnover in the railway network by 42 % by 2025. One of the ways to achieve this goal is to increase the operating speed of freight trains. Currently, after reaching the maximum voltage at the 4th zone of regulation of the reversible converter, the speed is further adjusted by changing the magnetic flow by connecting the system of field weakening of the contactor-rheostat type in parallel to the excitation windings of the traction electric motor. The article discusses the disadvantages of this system. An analytical justification is provided for the fact that step-by-step switching of the electric locomotive traction motor field weakening results in the losses of speed and acceleration. To check this statement, the simulation of AC electric locomotive of the 2ES5K series with step-by-step and smooth adjustment of the traction electric motor field weakening was carried out in the software package "CORTES" while passing along the Zima-Irkutsk-Sortirovochny section. The simulation results showed that the smooth regulation of the traction electric motor field weakening provides an increase in the technical speed of an electric locomotive by at least 2.5 km/h. An advanced field weakening system for traction electric motors on the basis of modern power fully controlled IGBT-transistor semiconductor devices that provide smooth regulation of the excitation current is proposed. The use of this system will eliminate the disadvantages of the standard system of weakening the field of electric traction motors of an electric locomotive and increase the operating speed of an electric moving train by at least 2.5 km/h.

Keywords

electric rolling stock, field weakening system of traction electric motors, operating speed, speed and acceleration losses, IGBT transistor.

For citation

Volchek T. V., Mel'nichenko O. V., Shramko S. G., Tomilov V. S. Povyshenie tekhnicheskoi skorosti elektropodvizhnogo sostava za schet obespecheniya plavnogo regulirovaniya toka vzbuzhdeniya tyagovykh elektrodvigateli [Increasing the technical speed of electric rolling stock by providing smooth regulation of the excitation current of the traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 166–172. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).166-172

Article Info

Received: 25.02.2020, Revised: 16.04.2020, Accepted: 12.05.2020

Введение

Согласно основным стратегическим документам ОАО «РЖД» к 2025 г. необходимо повысить грузооборот сети железных дорог на 42 % [1, 2]. Одним из способов достижения поставленной цели является повышение технической скорости движения поездов.

В настоящее время скорость на электровозах переменного тока регулируется за счет изменения напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД) [3–6]. После того, как достигнуто максимальное напряжение на 4-й зоне регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя дальнейшая

регулировка скорости осуществляется изменением магнитного потока ТЭД за счет подключения параллельно обмоткам возбуждения ТЭД системы ослабления поля (ОП) (рис. 1) [3–6].

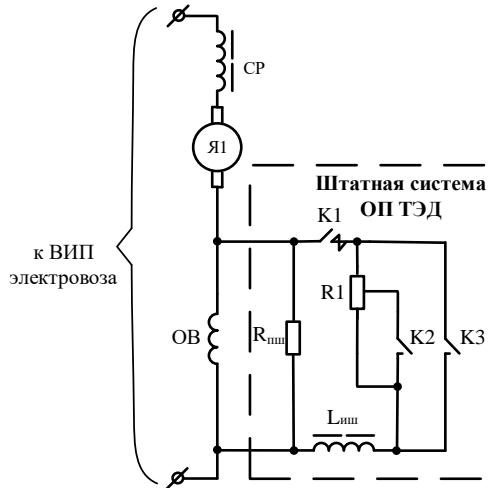


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема ослабления поля тяговых электрических двигателей электровоза

Fig. 1. Electrical schematic diagram of the field weakening of traction electric motors of the electric locomotive

Одним из главных недостатков штатной системы ослабления поля тяговых электродвигателей (ОП ТЭД) является ограниченное число ступеней ОП со ступенчатым переключением, что исключает возможность поддержки максимально-допустимой скорости движения поезда, а также вызывает резкое увеличение тока и силы тяги электровоза при переключении.

Влияние ступенчатого регулирования ослабления поля тяговых электродвигателей на скорость электровоза

Рассмотрим аналитическое обоснование того, что ступенчатое переключение ОП ТЭД приводит к потере скорости и ускорения.

Согласно уравнению движения поезда, ускорение электроподвижного состава определяется разностью максимальной силы тяги F_d и сопротивления движению W [6–8]

$$(1 + \gamma) \cdot m_a \cdot \frac{dV}{dt} = F_d - W = \Delta F, \quad (1)$$

где $(1 + \gamma) \cdot m_a$ – масса поезда с учетом инерции вращающихся частей, приходящейся на движущую ось локомотива; $\frac{dV}{dt}$ – изменение скорости движения поезда; ΔF – изменение силы тяги ТЭД.

Сила тяги ТЭД определяется согласно выражению [6–8]

$$F_d = C_F \cdot \Phi \cdot I_d, \quad (2)$$

где C_F – конструктивная постоянная колесно-моторного блока (КМБ), зависящая от параметров ТЭД и тягового редуктора; Φ – магнитный поток главных полюсов, зависящий от тока возбуждения, Вб; I_d – ток ТЭД, А.

Напряжение на ТЭД в номинальном режиме определяется согласно выражению

$$U_{дн} = C_v \Phi_n \cdot V_n + I_n \cdot \sum R_d, \quad (3)$$

где $U_{дн}$ – номинальное напряжение ТЭД, В; $\sum R_d$ – суммарное сопротивление обмоток ТЭД, Ом; I_n – номинальный ток ТЭД, А; C_v – конструктивная постоянная скорости.

Подставив выражение (3) в выражение (2) получим

$$F_d = C_F \cdot \Phi \cdot \frac{U_d - C_v \cdot \Phi \cdot V}{R} = C_F \cdot \Phi \cdot \frac{U_d}{R} - \frac{C_F \cdot C_v \cdot \Phi^2}{R} \cdot V.$$

Изменение силы тяги ТЭД относительно времени, учитывая жесткость тяговой характеристики, равно

$$\frac{F_d}{dt} = -x \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (4)$$

где x – это коэффициент, учитывающий жесткость

тяговой характеристики, который равен $x = \frac{F_d}{dt}$, т.

е. изменению силы тяги ТЭД, соответствующему изменению скорости вращения колесной пары [9].

Подставив выражение (4) в (1) получим

$$-\frac{m_a}{x} \cdot \frac{dF_d}{dt} = F_d - W,$$

или

$$T_{II} \cdot \frac{dF_d}{dt} + F_d = W,$$

где $T_{II} = \frac{m_a}{x}$ – постоянная времени разгона поезда.

В пределах одной ступени ОП ТЭД при условии: $W = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$, что соответствует работе ТЭД последовательного возбуждения в зоне насыщения, максимальная сила тяги $F_{сц.макс}$ ограничена возможностью срыва колесной пары в боксовании $F_{д.уст} + \Delta F = F_{сц.макс}$, считая, что в установив-

шемся режиме $F_{д.уст} = W$, когда $\frac{dV}{dt} = 0$.

При начальных условиях при $t = 0$, $F_{д.0} = W + \Delta F = F_{сц.макс}$; при $t = \infty$, $F_{д.уст} = W$. В период неизменного напряжения на ТЭД, учитывая, что тяговая характеристика имеет функцию экспоненты,

$$F_d(t) = F_{д.уст} + \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_{II}}} = W + \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_{II}}}. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в (1) получим

$$m_a \cdot \frac{dV_c}{dt} = F_{д}(t) - W = W + \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} - W = \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_n}},$$

где $\frac{dV_c}{dt}$ – изменение скорости при ступенчатом регулировании напряжения в пределах одной ступени регулирования.

Таким образом, при ступенчатом регулировании скорости возникают потери ускорения [8]

$$\Delta a = \frac{dV_c}{dt} = \frac{\Delta F}{m_a} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_n}}),$$

и потери скорости [8]

$$\Delta V = \frac{\Delta F}{m_a} \cdot \int (1 - e^{-\frac{t}{T_n}}) dt.$$

После интегрирования в пределах времени выдержки τ на ступени регулирования получим:

$$\Delta V = \frac{\Delta F}{m_a} \cdot \left[\tau - T_n \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}}) \right].$$

Для исключения потерь скорости необходимо выполнение условия

$$\tau - T_n \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}}) = 0,$$

это возможно только при $\tau = 0$, что может быть реализовано при плавном регулировании ОП ТЭД электровоза. Так как $\tau = \frac{t_n}{n_p}$, где t_n – это общее время пуска, n_p – число ступеней регулирования ОП, если $n_p \rightarrow \infty$, то $\tau \rightarrow 0$ [9–12].

Моделирование электровоза переменного тока серии «2ЭС5К» со ступенчатым и плавным регулированием ослабления поля тяговых электродвигателей на участке Зима – Иркутск-Сортировочный в программном комплексе «Кортес»

Для подтверждения аналитического обоснования потери скорости и ускорения проведено моделирование электровоза «2ЭС5К» с тремя (штатная система ОП ТЭД) и девятью ступенями (моделирование плавного регулирования ОП) ОП ТЭД на участке Зима – Иркутск-Сортировочный в программном комплексе «Кортес» [13–14].

Из маршрутной карты машиниста на данном участке в программу «Кортес» записан профиль пути с ограничениями скорости по участку. Для проведения тяговых расчетов необходимо задать характеристики электровоза серии 2ЭС5К, используя данные из руководства по эксплуатации данного электровоза [6–7]. Характеристики электровоза для тягового и рекуперативного режима включают в себя зависимость силы тяги / торможения от скорости движения, $F_k = f(V)$ и $B_k = f(V)$ соответственно; зависимость тока двигателя от скорости движения, $I_{д} = f(V)$; зависимость потребляемого / рекуперированного электровозом тока от скорости, $I_{да} = f(V)$.

Далее приведены результаты тяговых расчетов в программе «Кортес» электровоза переменного тока 2ЭС5К со штатной системой ОП ТЭД по участку Зима – Иркутск-Сортировочный, где $I_{дв}$ – ток ТЭД; $I_{эл}$ – ток электровоза; V – скорость движения поезда; $V_{огр}$ – скорость ограничения на участке; T_n – температура нагрева ТЭД (рис. 2). Представлены основ-

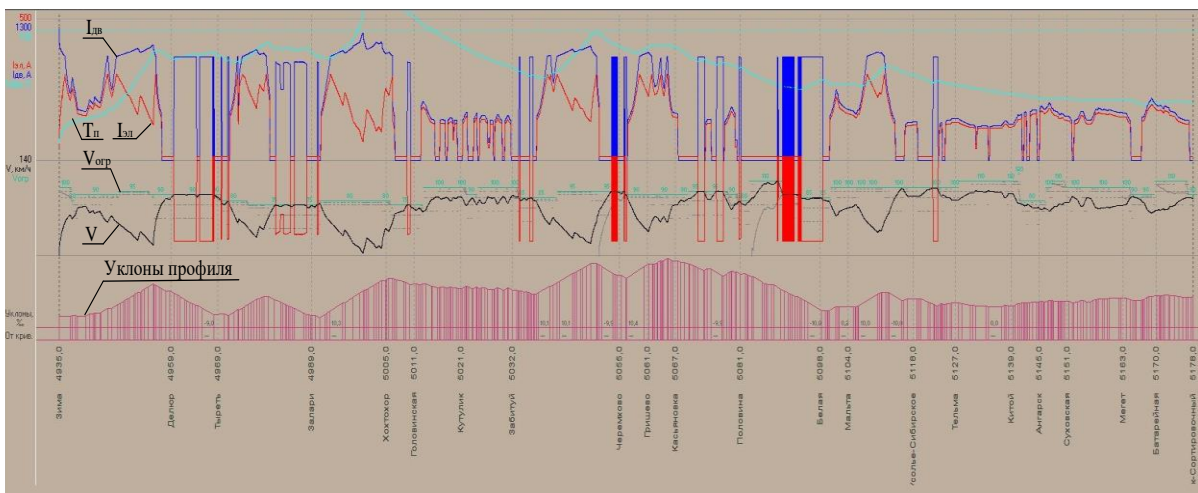


Рис. 2. Результаты тяговых расчетов в программе «Кортес» электровоза переменного тока «2ЭС5К» с тремя ступенями ослабления поля тяговых электродвигателей при следовании по участку Зима – Иркутск-Сортировочный

Fig. 2. Results of traction calculations in the program “Cortes” of the AC electric locomotive “2ES5K” with three stages of the field weakening of traction electric motors when passing along the section Zima – Irkutsk-Sortirovochny

ные полученные показатели (табл. 1).

Для проверки влияния плавного регулирования тока возбуждения электровоза пересчитана тяговая характеристика электровоза. Для этого между основными тремя ступенями ОП ТЭД заданы три дополнительные промежуточные ступени. Таким образом, смоделирован электровоз переменного тока 2ЭС5К с плавным регулированием ОП ТЭД. Далее приведены результаты тяговых расчетов в программе «Кортес» электровоза переменного тока «2ЭС5К» с плавным регулированием ОП ТЭД по участку Зима – Иркутск-Сортировочный (рис. 3), представлены основные полученные показатели (табл. 2).

Таким образом, система ОП ТЭД с плавным ре-

гулированием тока возбуждения позволит увеличить техническую скорость электровоза не менее чем на 2,5 км/ч, что снизит время хода электровоза, следовательно, повысится грузооборот сети железных дорог.

В связи с развитием силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов появилась возможность усовершенствовать систему ОП ТЭД [15]. Авторами предлагается усовершенствованная система ОП ТЭД на базе современных полностью управляемых полупроводниковых приборов IGBT-транзисторов, которые позволяют плавно регулировать ток возбуждения ТЭД [16–18]. Экономический эффект от внедрения усовершенствованной системы ОП на один электровоз серии «3ЭС5К» составит 393,71 тыс. руб. в год.

Таблица 1. Полученные показатели электровоза 2ЭС5К со штатной системой ослабления поля тяговых электродвигателей при следовании на участке Зима – Иркутск-Сортировочный

Table 1. The obtained indicators of the 2ES5K electric locomotive with the standard OP TED system when passing along the section Zima – Irkutsk-Sortirovochny

Время хода, мин.		Расход электроэнергии		Удельный расход электроэнергии		Техническая скорость, км/ч	Максимальный ток электровоза, А	Максимальный перегрев обмотки, °С
Полное	Под током	Активный, кВт·ч	Полный, кВа·ч	Активной, В·А·ч/т·км	Полной, В·А·ч/т·км			
255	211,7	14 580,6	20 166,1	13,4	9,7	57,2	439	153

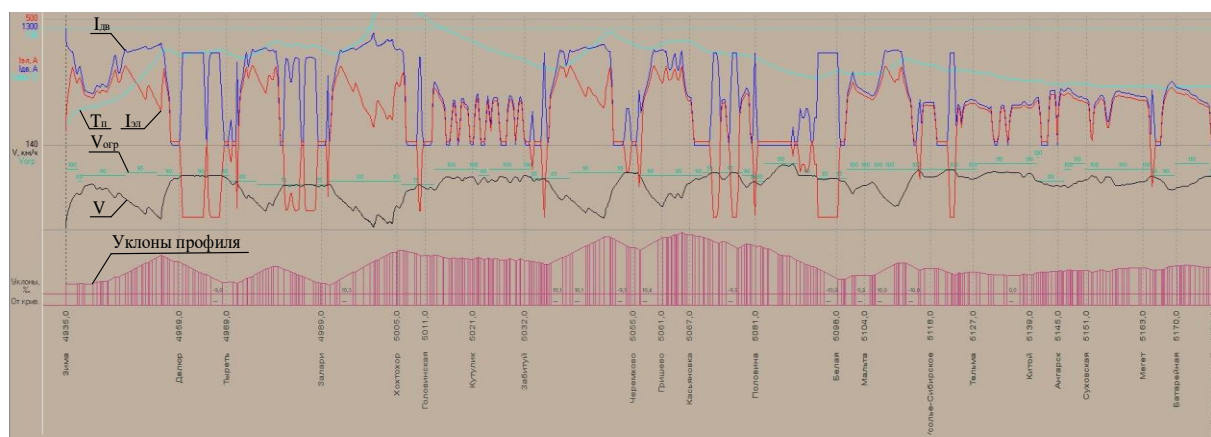


Рис. 3. Результаты тяговых расчетов в программе «Кортес» электровоза переменного тока «2ЭС5К» с плавным регулированием ослабления поля тяговых электродвигателей при следовании по участку Зима – Иркутск-Сортировочный

Fig. 3. Results of traction calculations in the program “Cortes” of the AC electric locomotive “2ES5K” with smooth regulation of the field weakening of traction electric motors when passing along the section Zima – Irkutsk-Sortirovochny

Таблица 2. Полученные показатели электровоза «2ЭС5К» с плавным регулированием ослабления поля тяговых электродвигателей при следовании на участке Зима – Иркутск-Сортировочный

Table 2. The obtained indicators of the “2ES5K” electric locomotive with smooth control of the field weakening of traction electric motors when passing along the section Zima – Irkutsk-Sortirovochny

Время хода, мин.		Расход электроэнергии		Удельный расход электроэнергии		Техническая скорость, км/ч	Максимальный ток электровоза, А	Максимальный перегрев обмотки, °С
Полное	Под током	Активный, кВт·ч	Полный, кВа·ч	Активной, В·А·ч/т·км	Полной, В·А·ч/т·км			
244	200,5	15 029,7	20 834,5	13,8	10	59,7	439	150

Заключение

Аналитически доказано, что ступенчатое регулирование вызывает потери скорости и ускорения поезда, которые исключаются при использовании плавного регулирования. Предложена система ОП ТЭД с плавным регулированием тока возбуждения на базе IGBT-транзисторов. В программном комплексе «Кортес» проведено моделирование электровоза «2ЭС5К» со штатной и предлагаемой системой ОП

ТЭД на участке Зима – Иркутск-Сортировочный. Получено, что плавное регулирование тока возбуждения позволит повысить техническую скорость электроподвижного состава не менее чем на 2,5 км/ч. Экономический эффект от внедрения предлагаемой системы ОП ТЭД на один электровоз серии «3ЭС5К» составит 393,71 тыс. руб. в год.

Список литературы

1. Белая книга ОАО «РЖД» №769/р от 17.04.2018 «Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года».
2. Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года (утверждена распоряжением Правительством РФ от 19.03.2019 г. № 466р).
3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрофицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1980. 470 с.
4. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов. М.: Транспорт, 1988. 312 с.
5. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М.: Транспорт, 1958. 277 с.
6. Плакс А.В. Система управления электрическим подвижным составом. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. 360 с.
7. Скобелев В.Е. Двигатели пульсирующего тока. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 208 с.
8. Евстафьев А.М. Электронные системы ослабления возбуждения тяговых двигателей электроподвижного состава [Текст]: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07: Защищена 02.03.2005 / Евстафьев Андрей Михайлович. Санкт-Петербург, 2005. 135 с.
9. Мазнев А.С., Баранов В.А., Богданов А.А. Тяговые характеристики электровозов ВЛ10 в режиме усиленного возбуждения [Текст] / А.С. Мазнев, В.А. Баранов, А.А. Богданов. // Известия ПГУПС. 2007. № 2. С. 62–69.
10. Мазнев А.С., Шатнев О.И., Евстафьев А.М. Электронные системы регулирования возбуждения для электроподвижного состава // Вестник РГУПС, 2007. № 3. С. 12.
11. Калинин М.В. Электронные системы ослабления возбуждения ТД электровозов переменного тока / Современные технологии – транспорту. Известия ПГУПС, 2009. С. 19–29.
12. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Электронные системы управления для электроподвижного состава постоянного тока / Современные технологии – транспорту, Известия ПГУПС, 2007. С. 60–69.
13. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации [Текст] / Новочеркасск: 2007. Т. 1. 635 с. Т. 2. 640 с.
14. Информационная система «Грузопоток» руководство по эксплуатации ООО ИЦ «Кортес», Москва, 2008.
15. Засорин С.Н., Мицкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника: Учебник для ж.-д. транспорта. Под ред. С.Н. Засорина. М.: Транспорт, 1981. 319 с.
16. Волчек Т.В. Возникновение трансформаторной ЭДС в секциях якоря тягового электродвигателя электровоза переменного тока в режимах полного и ослабленного поля и пути ее снижения [Текст] / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 1. С. 41–49.
17. Волчек Т.В. Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока [Текст] / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков // Известия Транссиба. 2019. № 3. С. 2–14.
18. Volchek T.V. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways [Text] / T.V. Volchek, V.S. Tomilov, E.A. Barenov // Пром-Инжиниринг: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (англ. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM). 2020.

References

1. Belaya kniga OAO «RZhD» No.769/r ot 17.04.2018 «Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda». [Russian Railways white paper No. 769/R dated 17.04.2018 “Strategy for scientific and technical development of Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030”].
2. Dolgosrochnoi programmy razvitiya OAO «RZhD» do 2025 goda (utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stvom RF ot 19.03.2019 g. No. 466r). [The long-term development program of “Russian Railways” OAO until 2025 (approved by the decree of the Government of the Russian Federation from 19.03.2019 No. 466r)].
3. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. Podvizhnoi sostav elektrofitsirovannykh zheleznykh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskie skhemy i apparaty. Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [Rolling stock of electrified Railways.

Theory of electrical equipment operation. Electrical circuits and devices. A textbook for universities of railway transport]. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: Transport Publ., 1980. 470 p.

4. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 312 p.

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

6. Plaks A.V. Sistema upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom. Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [Electric rolling stock control system. A textbook for railway transport universities]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 360 p.

7. Skobelev V.E. Dvigateli pul'siruyushchego toka [Motors of pulsating current]. 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad: Energoatomizdat Publ. Leningrad dept., 1985. 208 p.

8. Evstaf'ev A.M. Elektronnyye sistemy oslableniya vzbuzhdeniya tyagovykh dvigatelei elektropodvizhnogo sostava: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.22.07 [Electronic systems of attenuation of excitation of traction motors of electric rolling stock: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.07]. Saint Petersburg, 2005. 135 p.

9. Maznev A.S., Baranov V.A., Bogdanov A.A. Tyagovye kharakteristiki elektrovozov VL10 v rezhime usilennogo vzbuzhdeniya [Traction characteristics of VL10 electric locomotives in the mode of enhanced excitation]. *Izvestiya PGUPS [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2007. No. 2. Pp. 62–69.

10. Maznev A.S., Shatnev O.I., Evstaf'ev A.M. Elektronnyye sistemy regulirovaniya vzbuzhdeniya dlya elektropodvizhnogo sostava [Electronic excitation control systems for electric rolling stock]. *Vestnik RGUPS*, 2007. No. 3. Pp. 12.

11. Kalinin M.V. Elektronnyye sistemy oslableniya vzbuzhdeniya TD elektrovozov peremennogo toka [Electronic systems of attenuation of excitation of TD electric locomotives of alternating current]. *Sovremennye tekhnologii – transportu. Izvestiya PGUPS. [Modern technologies for transport, Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2009. Pp. 19–29.

12. Maznev A.S., Evstaf'ev A.M. Elektronnyye sistemy upravleniya dlya elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka Sovremennye tekhnologii – transportu [Electronic control systems for DC electric vehicles]. *Sovremennye tekhnologii – transportu. Izvestiya PGUPS [Modern technologies for transport. Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2007. Pp. 60–69.

13. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). An operation manual]. Novocheboksaysk: 2007. Vol. 1. 635 p. Vol. 2. 640 p.

14. Informatsionnaya sistema «Gruzopotok» rukovodstvo po ekspluatatsii OOO ITs «Kortes» [Information system “Cargo Flow” operating manual of LLC IC “Cortes”]. Moscow 2008.

15. Zasorin S.N., Mitskevich V.A., Kuchma K.G. Elektronnyye i preobrazovatel'naya tekhnika: Uchebnik dlya zh.-d. transporta [Electronic and transformative technology: A textbook for railway transport]. In Zasorin S.N. (ed.) Moscow: Transport Publ., 1981. 319 p.

16. Volchek T.V., Mel'nichenko O.V., Shramko S.G., Lin'kov A.O. Vozniknovenie transformatornoi EDS v sektsiyakh yakorya tyagovogo elektrodvigatelya elektrovoza peremennogo toka v rezhimakh polnogo i oslablennogo polya i puti ee snizheniya [The emergence of a transformer EMF in the armature sections of the traction motor of an AC electric locomotive in full and weakened field modes and ways of its reduction]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Vestnik RGUPS]*, 2020. No. 1. Pp. 41–49.

17. Volchek T.V., Melnichenko O.V., Lin'kov A.O. Matematicheskoe modelirovanie energoeffektivnoi sistemy oslableniya polya tyagovykh elektricheskikh dvigatelei elektrovozov peremennogo toka [Mathematical modeling of energy-efficient system of field attenuation of traction electric motors of alternating current locomotives]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2019. No. 3. Pp. 2–14.

18. Volchek T.V., Tomilov V.S., Barenov E.A. [Proposals for the introduction of modern power semiconductor devices in the Converter-collector locomotives of Russian Railways]. *Prom-Inzhiniring: Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [2020 international conference on industrial engineering, application and production, ICIEAM]*, 2020.

Информация об авторах

Волчек Татьяна Витальевна – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

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

Шрамко Сергей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: novorossereg@mail.ru

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

Information about the authors

Tat'yana V. Volchek – Ph.D. student of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

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

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

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