

10. Bagheri M., Saccomanno F., Chenouri Sh., Fu L. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 43, Iss. 3, May 2011, pp. 613–620. DOI 10.1016/j.aap.2010.09.008.
11. Eom B., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 11, 315–320 (2010). DOI 10.1007/s12541-010-0036-x.
12. Gilchrist A.O. and Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset. *J. Mech. Eng. Sci.*, 1976. Vol. 18. No. 3, pp. 131–141.
13. Ham Y., Lee D., Kwon S. et al. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2009. Vol. 10, pp. 35–39. DOI 10.1007/s12541-009-0006-3.
14. Kim M.S., Kim G.Y., Kim H.T., Koo J. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, t. 30, is. 8, pp. 3487–3498.
15. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheelset. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, Iss. 9, pp. 3483–3498, 2014.
16. Kuzyshin A., Batig A., Sobolevska J., Kostritsa S., Ursulyak L and Dovhaniuk S. Determining the causes of rolling stock derailment from the track using modern research methods. *MATEC Web of Conferences*, 209, 294, 03004. DOI 10.1051/mateconf/201929403004.
17. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 98, January 2017, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.aap.2016.09.012.
18. Nadal M.J. Locomotive à Vapeur. Paris, Collection encyclopédie scientifique, bibliothèque de mécanique appliquée et génie, 1908. Vol. 186.
19. Weinstock H. Wheel Climb Derailment Criteria for Evaluation of Rail Vehicle Safety. *ASME Winter Annual Meeting*, 1984, paper no. 84-WA/RT-1, pp. 1–7.
20. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh) [Standards for the calculation and design of railcars of the Ministry of Railways of 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. Moscow: State Research Institute of vehicle Building - Railway Research Institute of Russian Railways, 1996.
21. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Railcar dynamics]. Moscow: ASPOL Publ., 1991, 360 p.
22. Smol'yaninov A.V. and Jakupov A.R. Sravnitel'nyi analiz metodik rascheta ustoichivosti kolesnoi pary ot shoda s rel'sov [Comparative analysis of the methodology for calculating the stability of wheel sets]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2016, Iss. 49, pp. 48–54. DOI 10.20291/1815-9400-2016-2-48-54.
23. Koturanov V.N. and Kozlov M.P. Tekhnologicheskaya posledovatel'nost' ekspertnykh otsenok rabochikh kachestv universal'nogo gruzovogo vagona (na primere tsisterny 15-1443) [The technological sequence of expert evaluations of the working qualities of a universal freight railcar (for example, tank 15-1443)]. Moscow: MIIT Publ., 2013, 147 p.

#### Информация об авторах

**Громаков Максим Сергеевич** – аспирант кафедры нетягового подвижного состава, Российский университет транспорта, г. Москва, e-mail: maksimgromakov3011@gmail.com  
**Тармаев Анатолий Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: t38\_69@mail.ru  
**Беспалько Сергей Валерьевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры нетягового подвижного состава, Российский университет транспорта, г. Москва, e-mail: bespalco@yandex.ru

#### Information about the authors

**Maksim S. Gromakov** – Ph.D. student, Non-traction Rolling Stock Subdepartment, the Russian University of Transport, Moscow, e-mail: maksimgromakov3011@gmail.com  
**Anatolii A. Tarmaev** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Railway Cars and Rolling Stock Subdepartment, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: t38\_69@mail.ru  
**Sergei V. Bespal'ko** – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Non-traction Rolling Stock Subdepartment, the Russian University of Transport, Moscow, e-mail: bespalco@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).111-121

УДК 621.311

## Эффективность системы электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения

Н. Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, А. Л. Мартусов✉

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

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

#### Резюме

Повышение эффективности энергетического обеспечения электрической тяги поездов позволяет реализовать перспективные приоритетные направления развития холдинга ОАО «РЖД». Для выявления причин, сдерживающих увеличение провозной и пропускной способности железной дороги, в статье использованы новые энергетические характеристики элементов электроэнергетической системы, которые основаны на уточненном законе сохранения энергии в

электромагнитном поле с применением математического моделирования и FFT-спектрального анализа. Расчетами доказано, что эффективное напряжение в сети переменного несинусоидального тока снижается из-за падения напряжения на реактивных сопротивлениях в силовой электрической цепи и является основной причиной, которая снижает энергетическую эффективность электрической тяги, ограничивает массу поездов и скорость их вождения. С применением электрической тяги на постоянном токе высокого напряжения обеспечивается симметричная нагрузка трехфазной системы тягового электроснабжения, устраняются реактивные сопротивления в тяговой силовой электрической цепи и повышаются динамические и энергетические показатели системы. Предложенными техническими решениями и математическим моделированием в среде Simulink программы «Matlab» показана возможность повышения коэффициента полезного действия электрической тяги на постоянном токе напряжением 37,1 кВ с асинхронными трехфазными тяговыми двигателями на 15,6 % по сравнению с электрической тягой на переменном токе напряжением 27,5 кВ, скорости движения поездов – на 31,5 %. Уровень напряжения в середине межподстанционной зоны позволяет работать грузовым трехсекционными электровозам в номинальном режиме для тяги трех соединенных поездов, а скорость движения поездов может ограничиваться только допустимым током в проводах контактной подвески. В процессе выполнения исследований по частотному управлению режимом пуска и регулирования скорости асинхронных трехфазных тяговых электродвигателей разработаны способы управления входным электрическим сопротивлением электропривода, коэффициентом модуляции и глубиной модуляции трехфазного напряжения для ограничения ускорения, обеспечения надежного сцепления колес с рельсами и исключения автоколебаний в электромеханической системе тяги поезда.

#### Ключевые слова

эффективность энергетического обеспечения, активная мощность, сопротивление, спектральный анализ, гармонические составляющие, эффективное напряжение, электрическая тяга

#### Для цитирования

Рябченко Н. Л. Эффективность системы электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения / Н.Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, А. Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 111–121. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).111-121

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 25.01.2021, поступила после рецензирования: 05.02.2021, принята к публикации: 11.02.2021

## The effectiveness of the high-voltage direct current system of electric traction of trains

N. L. Ryabchyonok, T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, A. L. Martusov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

#### Abstract

Improving the efficiency of energy supply of electric traction trains allows us to implement promising priority areas of development of the holding company “Russian Railways” OAO. The article uses the new energy characteristics of the elements of the electric power system to identify the reasons that hinder the increase in the carrying capacity and throughput capacity of the railway. These characteristics are based on the refined law of conservation of energy in the electromagnetic field using mathematical modeling and FFT spectral analysis. Calculations have proved that the effective voltage in the AC network of non-sinusoidal current decreases due to a drop in the voltage at the reactances in the power electric circuit. This is the main reason that reduces the energy efficiency of electric traction, limits the mass of trains and the speed of driving trains. The use of high-voltage DC electric traction ensures a symmetrical load of the three-phase traction power supply system, eliminates reactive resistances in the traction power electric circuit and increases the dynamic, energy performance of the system. The proposed technical solutions and mathematical modeling in the Simulink environment of “Matlab” showed the possibility of increasing the efficiency of electric traction DC voltage of 37,1 kV three-phase asynchronous traction motors by 15,6 % compared to electric traction AC voltage of 27,5 kV, the speed of trains – by 31,5 %. The voltage level in the middle of the inter-substation zone allows freight three-section electric locomotives to operate in the nominal mode for traction of three connected trains. In this case, the speed of trains can be limited only by the permissible current in the wires of the contact suspension. Studies were conducted on the frequency control of the start-up mode and speed control of asynchronous three-phase traction motors. In the course of research performed, methods of controlling the input electrical resistance of the electric drive, the modulation coefficient and the modulation depth of the three-phase voltage were developed. The developed methods ensure the limitation of acceleration, reliable coupling of the wheels with the rails and the exclusion of self-oscillations in the electromechanical traction system of the train.

#### Keywords

energy supply efficiency, active power, resistance, spectral analysis, harmonic components, effective voltage, electric traction

#### For citation

Ryabchyonok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhantsev L. A., Tikhomirov V. A., Martusov A. L. Effektivnost sistem elektricheskoi energii v elektricheskii seti peremennogo toka [The effectiveness of the high-voltage direct current system of electric traction of

trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.111–121.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).111-121

### Article Info

Received: 25.01.2021, Revised: 05.02.2021, Accepted: 11.02.2021

### Введение

В транспортном комплексе, обеспечивающем экономическую и национальную безопасность России, важнейшую роль выполняет железнодорожный транспорт. Прогнозом научно-технологического развития страны определены наиболее перспективные приоритетные решения в области транспортных и космических систем, энергоэффективности и энергосбережения, рационального природопользования, новых материалов и нанотехнологий [1]. Холдингом ОАО «РЖД» утверждены стратегические инициативы, которые позволяют реализовать инновационные разработки, внедрение технических и высокотехнологических решений для значительного повышения производительности, эффективности использования ресурсов отрасли и электрической тяги поездов. Одной из стратегических инициатив отрасли является обновление и унификация оборудования системы энергетического обеспечения электрической тяги (СОД) и электроподвижного состава (ЭПС) локомотивного комплекса. За счет инновационных разработок поставлена задача по снижению потребления электроэнергии и непроизводительных потерь энергии во всех режимах работы не менее чем на 10 %. С внедрением, в соответствии с техническими и технологическими решениями, в отрасли необходимо обеспечить снижение экологической нагрузки на окружающую среду на 15 %. Решение задачи по повышению коэффициента полезного действия (КПД) в среднем на 3 % во всем диапазоне мощности локомотивов намечено реализовать за счет комплексной модернизации оборудования электрической тяги поездов. На перспективу рассматривается создание скоростных грузовых электровозов (до 140–160 км/ч) для обслуживания в том числе контейнерных поездов массой до 2 600 т. Предусмотрено создание модификаций существующих локомотивов, включая локомотивы с асинхронным приводом на отечественной элементной базе.

В соответствии с объявленным курсом в стране по импортозамещению следует учитывать прогноз по минимизации рисков, связанных с перестройкой и переориентацией на поставки отечественных комплектующих для нового оборудования отрасли. Достижение высоких технико-экономических показателей возможно за счет применения современного высокоэффективного основного и вспомогательного оборудования отечественного производства, что также обеспечивает реализацию федеральной программы по импортозамещению.

Реализация перспективной программы дальнейшего комплексного развития электрической тяги

поездов возможна при повышении компетенции специалистов отрасли и совершенствовании образовательного процесса в учебных учреждениях [2].

В настоящее время тяговые подстанции железных дорог имеют в основном внешнее электроснабжение трехфазным переменным током напряжением 220, 110 кВ. Тяговое электроснабжение на постоянном токе напряжением 3,3 кВ обеспечивается с помощью трехфазных двенадцатипульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) последовательного типа [3, 4]. На ЭПС постоянного тока применяются тяговые коллекторные электродвигатели (ТЭД) и асинхронные трехфазные тяговые двигатели (АТД). Для преобразования постоянного тока в частотно-регулируемое переменное трехфазное напряжение применяются трехфазные автономные инверторы напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [5].

Тяговое электроснабжение на переменном токе напряжением 27,5 кВ в основном выполняется с применением на тяговых подстанциях (ТП) трехфазных трехобмоточных трансформаторов и распределением фаз тяговых вторичных обмоток по фидерным зонам тяговой сети. Внедряется СОД на переменном токе напряжением 2×25 кВ с применением на подстанциях трех силовых однофазных тяговых трансформаторов с установкой на линии автотрансформаторных пунктов и контактной подвески с питающими и усиливающими проводами [6]. На ЭПС переменного тока для преобразования напряжения и регулирования мощности коллекторных ТЭД применяются однофазные трансформаторы с секционированной вторичной тяговой обмоткой и четырехзонный ВИП с импульсно-фазовым управлением [7]. Разработан двухсистемный ЭПС с АТД. Для регулирования мощности АТД применяются входной четырехквadrантный 4-qS преобразователь и трехфазный АИН с ШИМ [8, 9].

С помощью оборудования, которое разрабатывается и изготавливается в настоящее время сложно выполнить задачи по дальнейшему развитию электрической тяги поездов. Выявить причину, из-за которой не удастся успешно решить задачу одновременного повышения скорости вождения и массы поездов позволяет оценка энергетического обеспечения электрической тяги на железной дороге.

### Теоретическое обоснование

Известным балансом мощностей (1) на входе полупроводниковых преобразователей [10–12] специалисты ориентированы на разработку технических

решений для устранения мощности искажения и компенсации мощности сдвига:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (1)$$

где  $S$  – полная мощность на входе полупроводникового преобразователя;  $P_1$  – активная мощность основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя;  $Q_1$  – мощность сдвига (реактивная) основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя;  $T$  – мощность искажения (реактивная) основной гармоники напряжения и высших гармоник тока (кроме первой гармоники тока) на входе полупроводникового преобразователя.

К сожалению, в настоящее время подготовка будущих профессионалов в области разработки, изготовления и эксплуатации оборудования для электрической тяги ориентирована на устранение последствий неудовлетворительной работы оборудования (1). Технический и технологический прогресс возможен, если специалисты компетентны видеть и устранять причины, которые сдерживают дальнейшее совершенствование технических решений.

Теоремой Умова – Пойнтинга учтено сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за процесса энергообмена между источником энергии и реактивными элементами электрической цепи [13, 14]. Аналитически доказано что, вовремя энергообмена часть напряжения генератора электрической энергии не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии.

Новые энергетические характеристики оборудования электроэнергетической системы железной дороги (2) основаны на уточненном законе сохранения энергии в электромагнитном поле с использованием второго закона Кирхгофа, и теории спектрального анализа:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – активная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя;  $Q$  – реактивная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя;  $\Delta S$  – часть полной мощности на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой, учитывающая сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) преобразователя [15–17].

С помощью предложенных энергетических характеристик выявлена причина снижения эффективности и электромагнитной совместимости элементов электроэнергетической системы железной дороги. Из-за коммутационных процессов в полупровод-

никовых преобразователях и непроводящего состояния СПП сокращается продолжительность использования напряжения системы тягового электрооборудования для тяги поездов. Во время непроводящего состояния и коммутации тока в СПП полупроводникового преобразователя ЭПС напряжение на его токоприемнике не используется для тяги поезда, а из контактной сети ЭПС потребляет завышенный ток [18].

Полная мощность на входе преобразователя ЭПС с нагрузкой (3) рассчитывается по формуле:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I, \quad (3)$$

где  $U_k$  – действующее напряжение  $k$ -ой составляющей ряда Фурье на входе преобразователя ЭПС;  $I_k$  – действующий ток  $k$ -ой составляющей ряда Фурье на входе преобразователя ЭПС;  $U$  – действующее напряжение на входе преобразователя ЭПС;  $I$  – действующий ток на входе преобразователя ЭПС;  $k$  – номер составляющей ряда Фурье;  $n$  – номер последней из учитываемых гармоник.

Активную мощность (4) на входе преобразователя ЭПС предложено рассчитывать по формуле:

$$P = U_{C0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k, \quad (4)$$

где  $U_{C0}$  – постоянная составляющая напряжения на входе преобразователя ЭПС во время проводящего состояния СПП;  $I_0$  – постоянная составляющая тока на входе преобразователя ЭПС;  $U_{Ck}$  – действующее напряжение  $k$ -ой гармоники на входе преобразователя ЭПС во время проводящего состояния СПП;  $\varphi_k$  – угол сдвига по фазе тока  $k$ -ой гармоники относительно одноименной гармоники напряжения.

Так как реактивная мощность  $Q$  характеризует интенсивность энергообмена между реактивными элементами электрической цепи и источником энергии [13], то данная составляющая полной мощности формируется одноименными гармониками напряжения и тока на входе преобразователя с нагрузкой (5):

$$Q = \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k. \quad (5)$$

Частью полной мощности на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой  $\Delta S$  (6) учитывается сокращение продолжительности использования напряжения на токоприемнике ЭПС для работы тягового электропривода:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (6)$$

где  $U_{pk}$  – действующее напряжение  $k$ -ой гармоники на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния или коммутации тока СПП;  $U_p$  – действующее напряжение на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния или коммутации тока СПП преобразователя ЭПС.

## Метод и результаты исследования

Основными элементами принципиальной силовой схемы электрической тяги на переменном токе (рис. 1)

являются тяговая подстанция, контактная сеть  $R_{кк}, L_{кк}$ , в секциях ЭПС тяговые трансформаторы TV, два ВИ-Па, четыре сглаживающих реактора  $R_s, L_s$  и четыре ТЭД  $M_1-M_4$ . Математическое моделирование работы системы выполнено с помощью программы «Matlab» в среде Simulink, энергетических характеристик (1–6) и спектрального FFT-анализа (рис. 2).

С помощью осциллографа и блока «powergui» (рис. 2) получены осциллограммы напряжения и тока на шинах ТП, в первичной и вторичной обмотке TV (рис. 3), гармонические составляющие напряжения  $U_k$ , тока  $I_k$  и угол сдвига по фазе тока  $\varphi_k$  относительно одноименной гармоники напряжения (табл. 1).

Суммарная активная мощность учитываемых

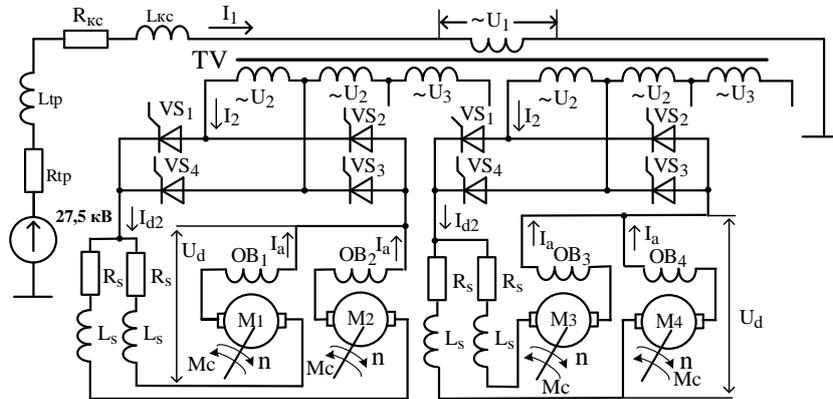


Рис. 1. Принципиальная схема электрической тяги на переменном токе  
 Fig. 1. Schematic of alternating current electric traction

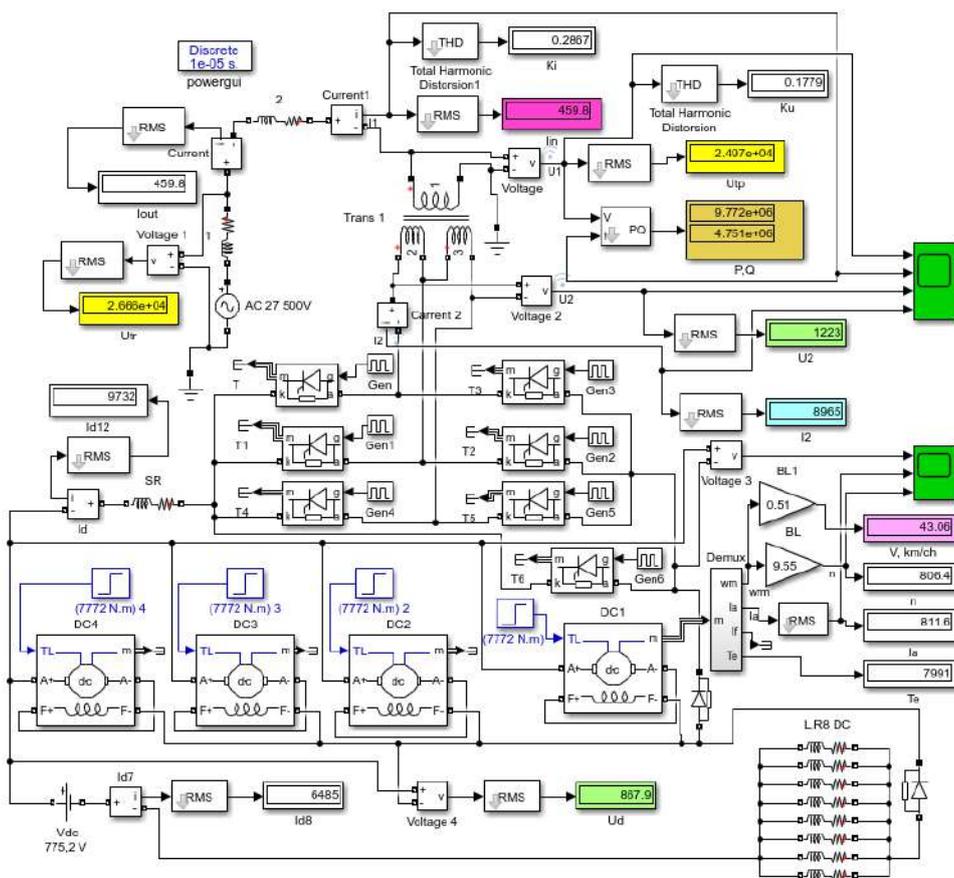
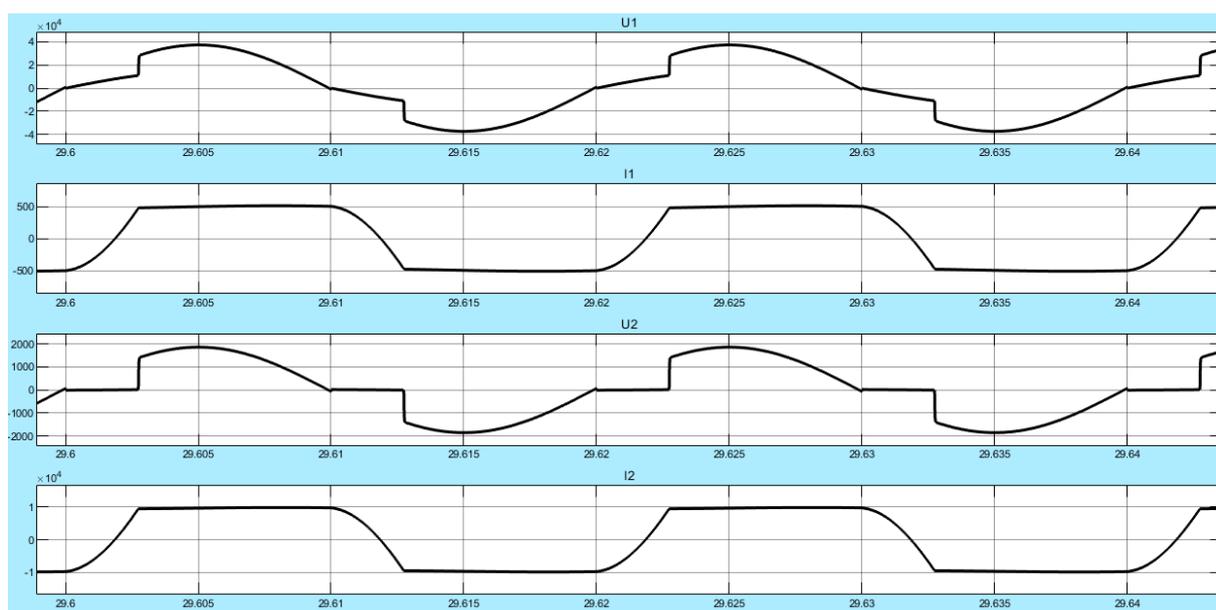


Рис. 2. Математическая модель электрической тяги поезда на переменном токе в середине межподстанционной зоны  
 Fig. 2. Mathematical model of alternating current electric traction of a train in the middle of the inter-substation zone

**Таблица 1.** Гармонические составляющие напряжения  $U_k$  (а), тока  $I_k$  (б) и угол сдвига по фазе тока  $\varphi_k$  (в) относительно одноименной гармоники напряжения

**Table 1.** Harmonic components of voltage  $U_k$  (a), current  $I_k$  (b) and phase angle of current  $\varphi_k$  (c) relative to the voltage harmonic of the same name

а											
$k$	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$U_{1k}$	В	26 590	1 390,6	928,0	497,2	329,7	340,3	289,8	210,1	196,8	196,8
$I_{1k}$	А	442,0	115,7	46,4	17,8	9,15	7,75	5,6	3,5	2,9	2,61
$\varphi_{1k}$	град.	29,2	439,6	300,3	130,2	269,7	422,5	246,6	47,4	269,5	364,1
б											
$k$	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$U_{1k}$	В	24 580	3 148,7	2 099,1	1 123,3	744,8	771,8	651,4	471,9	444,9	447,4
$I_{1k}$	А	442,0	115,7	46,4	17,8	9,15	7,75	5,6	3,5	2,9	2,61
$\varphi_{1k}$	град.	25,9	434,3	297,1	128,0	268	421	245,4	46,3	268,5	363,3
в											
$k$	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$U_{2k}$	В	1 171,0	252,7	168,5	90,3	59,8	61,9	52,3	37,9	35,7	35,8
$I_{2k}$	А	8 602	2 304,5	924,7	354,4	182,4	154,8	111,0	69,7	57,6	51,6
$\varphi_{2k}$	град.	20,8	435,6	298,5	129,8	266,6	423,5	248,3	49,6	265,8	367,3



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения, тока в первичной  $u_1, i_1$  и вторичной  $u_2, i_2$  обмотках ТВ электроподвижного состава

**Fig. 3.** Oscillograms of voltage, current in the primary  $u_1, i_1$  and secondary  $u_2, i_2$  windings TV of electric rolling stock

гармоник на шинах ТП  $P_{tr} = 10\,305,9$  кВт. Суммарная активная мощность учитываемых гармоник на входе электропривода  $P_3 = 9\,907,2$  кВт. Потери активной мощности в контактной сети  $\Delta P_{kc} = 398,7$  кВт. Суммарная активная мощность учитываемых гармоник вторичной обмотки трансформатора ЭПС  $P_2 = 9\,619,9$  кВт. Потери активной мощности в трансформаторе  $\Delta P_{tr} = 287,3$  кВт. Суммарная активная мощность на обмотках ТЭД  $8\,445,9$  кВт. По-

тери активной мощности в ВИП ЭПС  $\Delta P_{вип} = 1\,174$  кВт. Суммарная активная мощность на валах ТЭД  $7\,875,2$  кВт. Потери активной мощности в ТЭД  $570,7$  кВт. КПД СОД  $\eta = 93,3$  %. Из-за потерь активной мощности в ВИП, которые значительно превышают потери в других элементах электрической цепи, КПД ЭПС  $\eta_{эпс} = 79,5$  %, а КПД электрической тяги на переменном токе  $\eta = 74,2$  %.

**Таблица 2.** Результаты расчета составляющих баланса мощностей  
**Table 2.** The results of calculating the components of the power balance

$k$	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$P_{тр}$	кВт	10 259,3	29,0	21,7	-5,7	-0,02	1,22	-0,64	0,50	-0,005	0,51
$Q_{тр}$	кВАр	5 733,7	30,7	-31,2	6,8	-3,02	2,34	-1,49	0,54	-0,57	0,04
$P_{1к}$	кВт	9 773,1	98,6	44,4	-12,3	-0,25	2,90	-1,52	1,14	-0,03	1,16
$Q_{1к}$	кВАр	4 745,6	350,7	-86,7	15,8	-6,80	5,20	-3,3	1,19	-1,29	0,07
$P_{2к}$	кВт	9 416,4	144,8	74,3	-20,5	-0,65	4,27	-2,1	1,71	-0,15	1,83
$Q_{2к}$	кВАр	3 577,0	564,0	-139,9	24,6	-10,9	8,57	-5,4	2,01	-2,05	0,23

С помощью формул (3–6) рассчитаны составляющие баланса мощностей (2) (табл. 2).

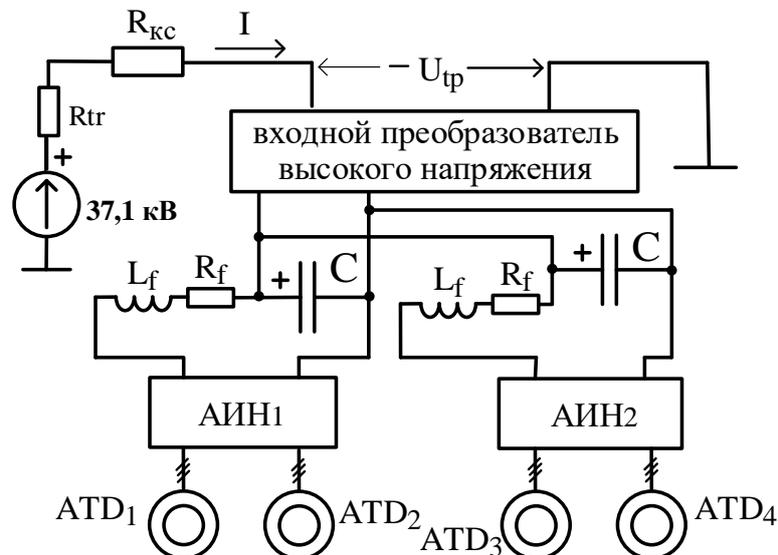
Суммарная реактивная мощность учитываемых гармоник напряжения и тока на шинах ТП  $Q_{тр} = 5 737,8$  кВАр, на входе электропривода  $Q_3 = 5 020,5$  кВАр. Потери реактивной мощности в контактной сети  $\Delta Q_{кc} = 717,3$  кВАр. Суммарная реактивная мощность учитываемых гармоник напряжения и тока во вторичной обмотке трансформатора ЭПС  $Q_2 = 4 018,2$  кВАр. Потери реактивной мощности в трансформаторе ЭПС  $\Delta Q_{ТВ} = 1 002,3$  кВАр. Коэффициент мощности на шинах ТП  $K_{МТП} = 0,841$ . Коэффициент мощности на входе электропривода ЭПС  $K_{М1} = 0,863$ .

Величина реактивных сопротивлений несинусоидальному току основных силовых элементов электрической тяги на переменном токе значительно превышает активное сопротивление. Из-за падения напряжения на реактивных и активных сопротивлениях элементов СОД и ЭПС переменного тока отклонение напряжения на обмотках ТЭД составляет 31 %, поэтому скорость движения поезда ограничивается и составляет 43 км/ч.

Решение проблемы возможно с применением электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения и устранением индуктивного сопротивления в контуре силовой электрической цепи напряжением 37,1 кВ (рис. 4).

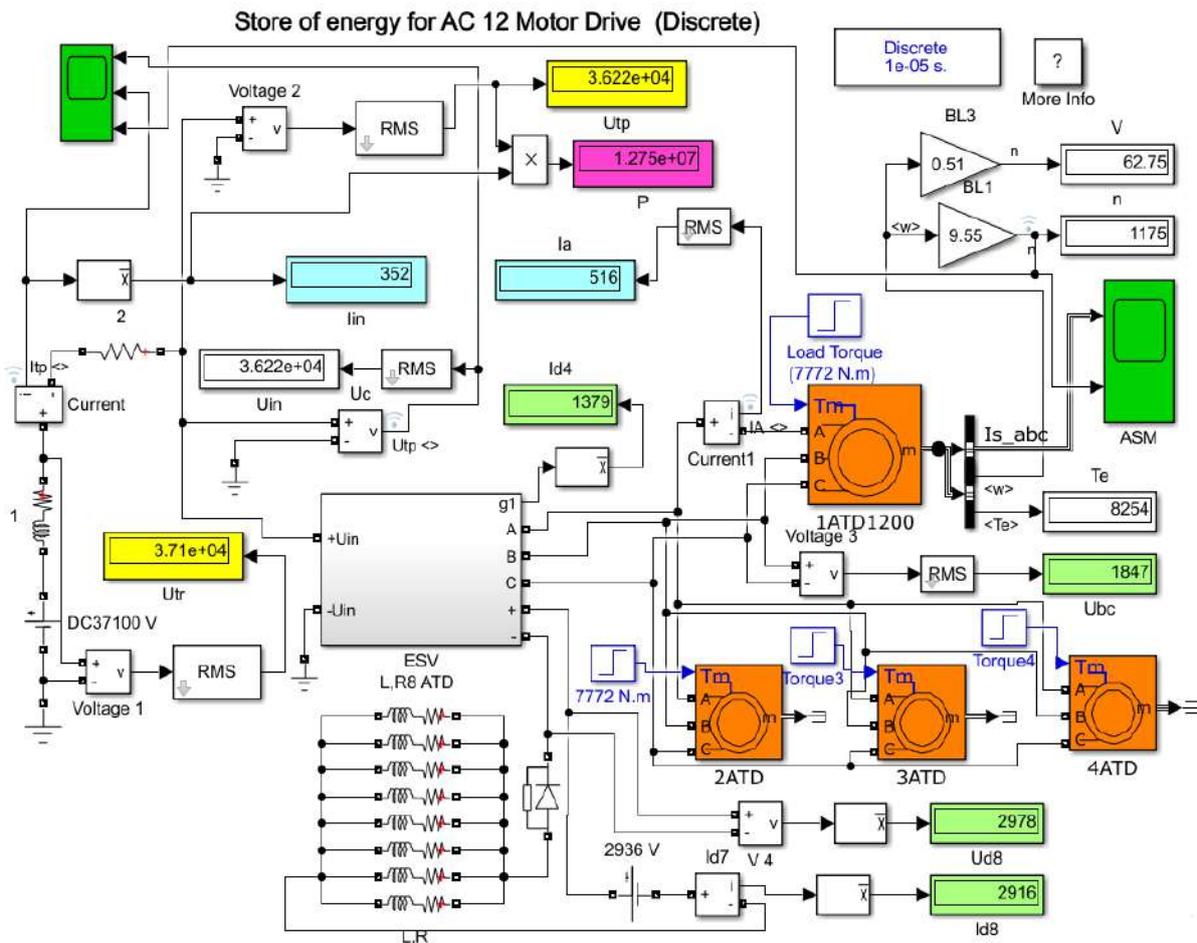
На ТП к вторичным обмоткам с линейным напряжением 27,5 кВ трехфазных тяговых трансформаторов присоединены трехфазные выпрямители, накопители электрической энергии и полупроводниковые стабилизаторы выпрямленного напряжения. К контактной сети сопротивлением  $R_{кc}$ , которая применялась для тяги поезда на переменном токе, присоединен входной преобразователь высокого напряжения ЭПС, который имеет свойство электрического полупроводникового вариатора при работе в сочетании с накопителями электрической энергии  $C$ , реакторами  $R_f$ ,  $L_f$  и трехфазными АИН. Для тяги поезда применяются асинхронные трехфазные тяговые двигатели.

Математическая модель тяги поезда трехсекционным электровозом с АТД и СОД постоянного тока напряжением 37,1 кВ (рис. 5) позволяет оценить динамические и энергетические свойства системы.



**Рис. 4.** Принципиальная схема электрической тяги на постоянном токе с одной секции электроподвижного состава

**Fig. 4.** Schematic of electric traction on direct current from one section of electric rolling stock



**Рис. 5.** Математическая модель системы энергетического обеспечения электрической тяги и электроподвижного состава постоянного тока напряжением 37,1 кВ с асинхронным тяговым двигателем в установившемся режиме работы при  $V = 63$  км/ч

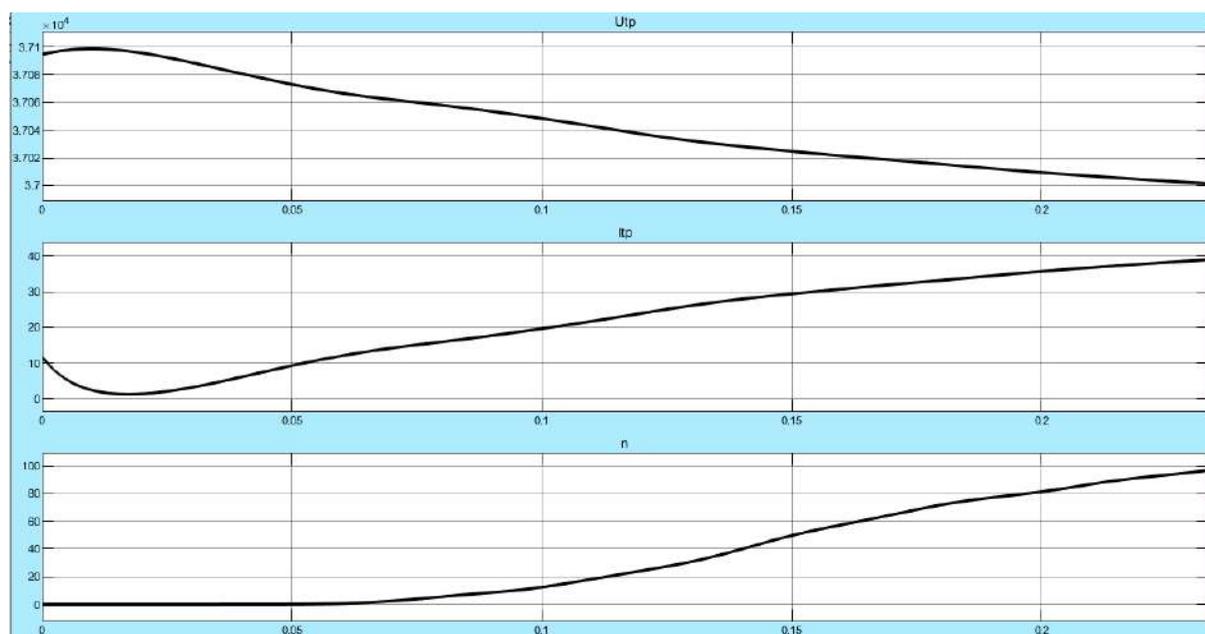
**Fig. 5.** Mathematical model of the power supply system for electric traction and electric rolling stock of direct current with a voltage of 37.1 kV with asynchronous traction motor in steady-state operation at  $V = 63$  km/h

При подаче напряжения  $U_{\text{cp}}$  на токоприемник (рис. 6) ток заряда  $I_{\text{cp}}$  промежуточного накопителя электрической энергии в ESV снижается до нуля, а напряжение  $U_{\text{cp}}$  повышается до напряжения в контактной сети. В момент  $t = 0,02$  с на обмотки статора АТД ЭПС подается трехфазное напряжение частотой 5 Гц, а контактная сеть и ТП загружаются током. При  $I_{\text{cp}} = 13$  А вал электродвигателей начинает вращаться, повышается скорость до  $n = 97$  об/мин, повышается ток до 40 А и снижается напряжение на токоприемнике до 37 кВ. КПД электрической тяги при скорости движения  $V = 5$  км/ч составляет  $\eta_{\text{ЭТ}} = 63,8\%$ .

При работе системы в данном режиме требуется увеличивать входное электрическое сопротивление ЭПС преобразователем высокого напряжения с целью согласования величины коэффициента модуляции и глубины модуляции в системе управления АИН. Так как АТД при  $f = 5$  Гц работает на жесткой рабочей ветви механической характеристики, то для

ограничения ускорения, обеспечения надежного сцепления колес с рельсами и для исключения автоколебаний в системе возникает необходимость в повышении входного электрического сопротивления АТД, в применении ПИД-регулятора с использованием обратных связей по скорости вращения вала и по току в обмотках статора АТД.

Для плавного разгона поезда до скорости 63 км/ч (см. рис. 5) необходимо одновременно преобразователем высокого напряжения (см. рис. 4) уменьшать входное электрическое сопротивление ЭПС, а в системе управления АИН изменять величину коэффициента модуляции и глубину модуляции. В данном режиме работы системы суммарная мощность на валах 12-и АТД  $P_{\text{в}} = 11\,475$  кВт, активная мощность на токоприемнике ЭПС  $P_{\text{cp}} = 12\,749$  кВт и активная мощность на шинах ТП  $P_{\text{т}} = 13\,059$  кВт. КПД ЭПС составляет 90 %, КПД СОД 97,6 % и КПД электри-



**Рис. 6.** Осциллограммы напряжения  $U_{tp}$ , тока  $I_{tp}$  и скорости вращения вала  $n$   
**Fig. 6.** Oscillograms of voltage  $U_{tp}$ , current  $I_{tp}$  and shaft rotation speed  $n$

ческой тяги поезда на постоянном токе напряжении 37,1 кВ с АТД – 87,9 %.

#### Заключение

Таким образом, энергетическую эффективность электрической тяги поездов можно повысить на 15,6 % по сравнению с электрической тягой на пе-

ременном токе напряжением 27,5 кВ, скорость движения – на 31,5 %. Уровень напряжения в середине межподстанционной зоны позволяет работать трехсекционным грузовым электровозам в номинальном режиме для тяги трех соединенных поездов, а их скорость движения может ограничиваться допустимым током в проводах контактной подвески.

#### Список литературы

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : Министерство образования и науки РФ, 2014. 244 с.
2. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Новые возможности повышения эффективности образовательного процесса в учебных заведениях высшего образования // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск : ИГУ, 2018. С. 837–843.
3. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : Урал. гос. ун-т путей сообщ., 2012. 207 с.
4. Салита Е.Ю., Ковалева Т.В., Комякова Т.В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
5. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2015. Т. 2. 307 с.
6. Чернов Ю.А. Электроснабжение железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2016. 406 с.
7. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-1000-У1 : руководство по эксплуатации ИЕАЛ.435411.046 РЭ. Саранск : ОАО «Электровыпрямитель», 2008. 35 с.
8. Тайгелькеттер И., Ширенгер Д. Мощный преобразователь на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе. Мюнхен : Siemens AG, 2000. 5 с.
9. Литовченко В.В. 4gS-четырёхквadrанный преобразователь электровозов переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. 2000. № 3. С. 64–73.
10. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York : Wiley, 2007. 379 p.
12. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems // Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. London : Springer Nature, 2012. 492 p.
13. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field // Philosophical Transactions of the Royal Society. T. 175. London, 1884. P. 343–361.
14. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
15. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm) (дата обращения 10.04.2020).

16. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава / А.В. Воротилкин, Н.Л. Михальчук, Н.Л. Рябченко и др. // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 6. С. 62–76.
17. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20, № 2. С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
18. Рябченко Н.Л. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева и др. // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 29–41.

### References

1. Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Moscow: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, 2014. 244 p.
2. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhansev L.A. Novye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa v uchebnykh zavedeniyakh vysshego obrazovaniya [New opportunities to increase the efficiency of the educational process in educational institutions of higher education]. Materialy III vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya" [Materials of III All-Russian Scientific and Practical Conferences with International Participation "Modern problems of vocational education: experience and solutions"]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2018. Pp. 431–434.
3. Arzhannikov B.A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov: Monografiya [Traction DC power supply for high-speed and heavy-duty train traffic: a monograph]. Ekaterinburg: USURT Publ., 2012. 207 p.
4. Salita E.Yu., Kovaleva T.V., Komyakova T.V. Obosnovanie vnedreniya dvenadtsatipul'sovykh vypryamitelei posledovatel'nogo tipa v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Justification of the introduction of twelve-pulse serial rectifiers in the metro power supply system]. Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]. Omsk State University of Railway Transport. Omsk, 2020, No. 1 (41). Pp. 11–20.
5. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converter technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015. Vol. 1. 307 p.
6. Chernov Yu.A. Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog [The power supply of railways]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2016. 406 p.
7. Preobrazovatel' vypryamitel'no-invertornyi VIP-1000-U1: Rukovodstvo po ekspluatatsii IEAL.435411.046 [Rectifier-inverter VIP-1000-U1 converter: Operating manual IEAL.435411.046 RE]. Saransk: Elektrovypryamitel' OAO Publ., 2008. 35 p.
8. Taigel'ketter I., Shirenger D. Moshchnyi preobrazovatel' na IGBT-tranzistorakh dlya primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Powerful IGBT-transistor converter for application on a cross-line rolling stock]. Munich: Siemens AG, 2000.
9. Litovchenko V.V. 4gS-chetyrekhkvadrantnyy preobrazovatel' elektrovozov peremennogo toka [4gS -quadrant converter of AC electric locomotives]. Izv. Vuzov Elektromekhanika [Proceedings of Higher Education Institutions. Electrical mechanics], 2000. No. 3. Pp. 64–73.
10. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy characteristics of valve converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York: Wiley, 2007. 379 p.
12. Francesco V., Luigi I. Dynamic and control of switched electronic systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. Springer, 2012. 492 p.
13. Poynting J.H. On the transfer of energy in the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society. London: 175, 1884, Pp. 343–361.
14. Demirchan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical bases of an electrical engineering]. St. Petersburg: Piter Publ., 2009. Vol. 2. 431 p.
15. Ryabchenok N.L., Alexeyeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhansev L.A. Utochnenniy zakon sokhraneniya energii [Refined energy conservation law]. Materialy XI Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji "Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami" [Materials of the XI international scientific and practical conference "prospective studies in science and technology"], 2015. V. 11, Techniczne nauki. Przemysl (Poland): Nauka i studia. Pp. 63–74.
16. Vorotilkin A.V., Mikhalkuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnye perspektivy tyagovogo elektropodvizhnogo sostava [Innovative perspectives of traction rolling stock]. Mir transporta [World of transport], 2015. Vol. 13. No. 6. Pp. 62–76.
17. Alexeyeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tseyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy efficiency in electrical circuits with semiconductor devices]. Vestnik YurGU. Seriya «Energetika». [Bulletin of the South Ural State University. Series: "Power engineering"], 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 89–99.
18. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of the traction drive of mainline electric locomotives]. Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]. Omsk State Transport University Publ. Omsk, 2020. No. 1(41). Pp. 29–41.

**Информация об авторах**

**Рябченко Наталья Леонидовна** - к. т. н., доцент, заведующая кафедрой «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astranal@mail.ru

**Алексеева Татьяна Леонидовна** - к. т. н., доцент, доцент кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: talecseeva843@gmail.com

**Астраханцев Леонид Алексеевич** - д. т. н., профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

**Тихомиров Владимир Александрович** – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: svat\_irk@mail.ru

**Мартусов Алексей Леонидович** – инженер, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, aleksey.martusov@yandex.ru

**Information about the authors**

**Natalya L. Ryabchyonok** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astranal@mail.ru

**Tatyana L. Alekseeva** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: talecseeva843@gmail.com

**Leonid A. Astrakhantsev** – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

**Vladimir A. Tikhomirov** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: svat\_irk@mail.ru.

**Aleksei L. Martusov** – engineer, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).121-126

УДК 621.311

**Проектирование сортировочных устройств в современных условиях**Л. Н. Иванкова<sup>1</sup>, А. Н. Иванков<sup>2</sup>, А. Н. Кузнецова<sup>1</sup>✉<sup>1</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> ООО «ПСК ТехПроект», г. Москва, Российская Федерация

✉ aa135@mail.ru

**Резюме**

В статье выполнен анализ основных проблем, возникающих при проектировании сортировочных горок. За последние годы появились новые вагоны, изменились конструкции пути, в том числе на сортировочных горках. В практике проектирования встречается применение кривых менее 200 м, укладка одиночных обыкновенных стрелочных переводов марки 1/9, уменьшение расстояния между вершиной горки и первым стрелочным переводом при проектировании плана. Эти факторы негативно сказываются на работе сортировочных горок. Подчеркивается, что действующие методики ориентированы в основном на обеспечение скатывания одиночных бегунов и мало подходят для расчетов при скатывании групповых отцепов. При скатывании такого отцепа происходит уменьшение его ускорения на скоростном участке горки, что впоследствии приводит к потере эффективности торможения и снижению перерабатывающей способности горки. Большой проблемой является также разделение групповых отцепов с одиночными вагонами на стрелочных переводах. Рассмотрены способы расформирования многовагонных отцепов при делении состава на части и без разукрупнения групп. Выявлены основные негативные факторы, влияющие на скорость роспуска. Поскольку основную нагрузку несет вторая тормозная позиция, предложено увеличить ее мощность путем укладки дополнительных замедлителей. Сделан вывод, что существующие методы расчета не позволяют учесть все многообразные факторы, влияющие на качество сортировочного процесса.

**Ключевые слова**

план и профиль сортировочных горок, расформирование составов, многовагонный отцеп, скорость скатывания на головном участке, мощность замедлителей, укладка дополнительных замедлителей

**Для цитирования**

Иванкова Л.Н. Проектирование сортировочных устройств в современных условиях / Л. Н. Иванкова, А. Н. Иванков, А. Н. Кузнецова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 121–126. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).121-126

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 15.02.2021, поступила после рецензирования: 25.02.2021, принята к публикации: 28.02.2021

**Design of sorting devices in modern conditions**L. N. Ivankova<sup>1</sup>, A. N. Ivankov<sup>2</sup>, A. N. Kuznetsova<sup>1</sup>✉<sup>1</sup> The Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation<sup>2</sup> «PSK TekhProekt» OOO, Moscow, the Russian Federation

✉ aa135@mail.ru